

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20231027001

http://www.yykxjz.cn/

刘子烁, 刘诗伟, 杨玉祥, 靳玮, 马晓娜, 冯志华. 藻类净水除杂系统对微塑料及氮、磷去除效果的影响. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 114–122

LIU Z S, LIU S W, YANG Y X, JIN W, MA X N, FENG Z H. An algae water purification and decontamination system that removes microplastics, nitrogen and phosphorus. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 114–122

## 藻类净水除杂系统对微塑料及 氮、磷去除效果的影响\*

刘子烁<sup>1</sup> 刘诗伟<sup>1</sup> 杨玉祥<sup>1</sup> 靳玮<sup>1</sup> 马晓娜<sup>1,2</sup> 冯志华<sup>1,2①</sup>

(1. 江苏海洋大学 江苏省海洋生物资源与环境重点实验室 江苏 连云港 222005;

2. 江苏海洋大学 江苏省海洋生物产业技术联合创新中心

自然资源部滨海盐沼湿地生态与资源重点实验室 江苏 连云港 222005)

**摘要** 微塑料污染和养殖尾水超标排放已成为全球重要问题。在同一系统中,同时研究丝状藻对氮、磷的去除效果和对微塑料的拦截效果尚未见报道。为解决这一问题,本研究构建了一种藻类净水除杂系统,并研究其拦截微塑料和去除水体氮、磷的能力。研究使用水绵(*Spirogyra*)、浒苔(*Enteromorpha*)和刚毛藻(*Cladophora*) 3种丝状藻在净水除杂系统中进行微塑料拦截实验,结果显示,实验时间为10 d时,3种丝状藻对纤维状微塑料拦截效果最佳(水绵88.50%,浒苔79.50%,刚毛藻75.50%),对颗粒状微塑料拦截效果最差(水绵67.50%,浒苔53.00%,刚毛藻55.00%)。与其他2种藻类相比,水绵对微塑料具有更好的拦截效果,因此,使用水绵进行水体氮、磷去除实验。将单位面积的藻量分为0、2、4和6 g/dm<sup>2</sup>,在15 d的实验中,水绵对总氮的去除率最高为91.88% (4 g/dm<sup>2</sup>),对总磷的去除率最高为90.33% (6 g/dm<sup>2</sup>),对PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P去除率最高为90.38% (6 g/dm<sup>2</sup>)。4 g/dm<sup>2</sup>与6 g/dm<sup>2</sup>组的结果无显著差异(P>0.05)。研究表明,净水除杂系统可有效去除水体中纤维状微塑料和吸收水体氮、磷,且4 g/dm<sup>2</sup>的藻量是本净水除杂系统去除氮、磷最适宜的藻量。

**关键词** 微塑料; 养殖尾水; 丝状藻; 净水除杂系统

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2024)02-0114-09

早在1972年, Science报道了聚苯乙烯小球出现在英格兰群岛南部近海水体中,且含量丰富,其粒径范围为0.1~2.0 mm (Carpenter *et al*, 1972)。Thompson等(2004)最早提出“微塑料”的相关概念,定义了微塑料为粒径小于5 mm的塑料颗粒,从此微塑料污染问题开始被全球所关注。对典型养殖海湾中微塑料污染的研究发现,沉积物中的微塑料丰度已达到中等污

染水平(宋可心等, 2023)。对长江三角洲养殖池塘进行研究发现,微塑料广泛存在于养殖环境中(Yu *et al*, 2023)。养殖环境中的微塑料可以在河流、洋流和给排水系统作用下排放到海洋环境中并进行长距离运输(Geng *et al*, 2023)。大量追踪微塑料的研究发现,在北大西洋(Courtene-Jones *et al*, 2022)、太平洋(Ding *et al*, 2022; Law *et al*, 2014)甚至北冰洋及深海区域均

\* 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大项目(22KJA170001)、连云港市重点研发计划(社会发展)(SF2336)、连云港市第六期“521工程”科研项目(LYG06521202265)和江苏高校优势学科建设工程项目共同资助。刘子烁, E-mail: 1164655988@qq.com

① 通信作者: 冯志华, 教授, E-mail: fengzhihua@jou.edu.cn

收稿日期: 2023-10-27, 收修改稿日期: 2023-11-13

存在较大程度的微塑料污染(Ikenoue *et al*, 2023)。几乎在所有海洋和淡水环境中发现了微塑料,除水环境外,在内陆偏远地区和国家保护区中也发现了微塑料(Zhang *et al*, 2023),微塑料在世界范围内已广泛分布(Maria *et al*, 2021)。微塑料的形态类似于某些有机物和浮游生物,很容易被鱼类、浮游动物和底栖生物误食,从而对生物体的生长造成危害。从小型无脊椎动物到大型掠食性哺乳动物,在各种各样的水生动物中都观察到了微塑料摄入的证据(Kalčíková, 2023)。如果可食用的水生动物广泛摄入微塑料,就会对食品安全和人类健康构成潜在风险(Emenike *et al*, 2023)。

培养大型丝状藻类用于养殖尾水净化的生物修复技术,是目前环境修复技术的研究热点之一(Zhao *et al*, 2023; Carlos, 2016)。大型藻类能够在富营养化水体中生长,且其生长产物在多个行业具有应用价值(Lawton *et al*, 2016)。使用养殖尾水培养丝状藻类时,不需要添加任何额外养料,养殖尾水中含有的 N、P 营养物质可供大型丝状藻类生长所需,并能达到改善水质的作用(Guo *et al*, 2022)。利用大型丝状藻净化污水,首先,藻体本身易于培养和收集,其次,相比较传统的污水处理,在流程上更为简便且成本较低(Cui *et al*, 2023)。丝状藻的生物膜面积较大,对微塑料有较好的拦截和吸附效果(Peller *et al*, 2021)。大型丝状藻,如水绵(*Spirogyra*)、浒苔(*Enteromorpha*)、刚毛藻(*Cladophora*)等,在水体中最为常见(Zhao *et al*, 2023),它们在去除水质中的氮、磷等方面的效果明显高于硅藻、蓝藻等微藻种群(梁霞等, 2008a)。本研究基于丝状藻对水体的净化效果,选择这 3 种藻类构建藻床净水除杂系统,在此系统上开展大型丝状藻净化养殖尾水和拦截环境微塑料研究,旨在实现资源利用最大化,净化养殖尾水,去除环境微塑料,为探寻水生生态系统管理的全新方法提供策略。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验水绵藻株于 2023 年 4 月 23 号采集自江苏省连云港市石梁河区域(112°43'E, 33°58'N)。采集过程中,使用不锈钢棍将水绵藻体挑起,尽量保持藻体完整,然后用河水清洗藻体,尽量去除藻体上附着的泥

沙和其他生物,之后装入铝箔袋中取回。取回后将藻体使用蒸馏水清洗多次,沥干水分后,置于实验室长、宽、高分别为 50、30 和 20 cm 加有 SE (Selenite Enrichment)培养基的玻璃水缸中暂养。藻体在实验室补光灯下培养,光照强度为 3 000 lx,光照黑暗比为 16 h : 8 h,培养温度为 25 °C。在实验开始前,逐渐改变玻璃缸中养殖尾水的比例进行驯化培养。由于水绵种类繁多,本研究仅将采集的水绵鉴定到属。

实验刚毛藻藻株于 2023 年 5 月 28 号采集自江苏省连云港市石梁河河流入海口区域(119°15'E, 34°47'N)。采回后用蒸馏水反复清洗,然后放在 SE 培养基中培养,培养条件同水绵藻株。本研究仅将采集的刚毛藻鉴定到属。实验浒苔藻株于 2023 年 6 月 9 号采集自江苏省连云港市连岛区域(119°45'E, 34°77'N)。采回后用灭菌过滤海水反复清洗,暂存于 15 °C、光照强度约为 50  $\mu\text{mol photos}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  的低温海水中。本研究仅将采集的浒苔鉴定到属。

微塑料全部采用聚丙烯材质制作,粒径均为 1~2 mm,形态分别为纤维状、颗粒状和片状。藻类生长实验中,水绵和刚毛藻用水为淡水。由于浒苔为海水藻类,使用灭菌过滤海水调节总氮(TN)、总磷(TP)、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和 pH 指标与养殖尾水相一致。将此海水用作浒苔的生长实验用水。测定藻床净水除杂系统对养殖尾水中氮磷去除效果的实验用水为江苏省连云港市赣榆区某水产养殖厂排放的养殖尾水,使用前将水用 2.7  $\mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜过滤,水质情况见表 1。

本研究构建了一套藻床净化水体氮磷及微塑料系统,系统侧视图与俯视图如图 1 所示。

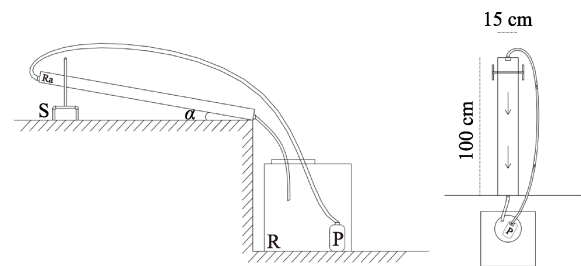


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup diagram

S: 金属支架; Ra: 亚克力板; R: 水箱; P: 水泵  
S: Metal bracket; Ra: Acrylic board;  
R: Water tank; P: Water pump

表 1 实验用水的性质  
Tab.1 Experimental water properties

pH	水温 Temperature /°C	电导率 Conductivity /( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	浊度 Turbidity /NTU	总氮 TN /( $\text{mg}/\text{L}$ )	总磷 TP /( $\text{mg}/\text{L}$ )	盐度 Salinity
7.5	25.2	809	12	21.9	3.1	11

实验净水除杂系统由藻板、水箱(体积  $V=40\text{ L}$ )、12 V 2.5 A 自吸泵和 PVC 水管组成。可更换藻板由亚克力制成,其长、宽分别为 50 和 15 cm,面积为  $7.5\text{ dm}^2$ 。在藻板上平铺软质 PVC 网格,便于将藻体固定其上。藻板整体倾斜  $15^\circ$  摆放,并固定在金属支架上。藻板上端下端分别固定水管,水管连接处均固定孔径为 5 mm 的金属筛网,防止藻类流出,影响实验结果。上端水管连接自吸泵和藻板,自吸泵将水从水箱抽至藻板顶端,流量设置为  $1\text{ L/min}$ 。水流均匀流过藻板后,经过藻板下端固定的水管回流至水箱中,完成循环。水箱口处用锡箔纸覆盖,防止外界灰尘、微生物或其他杂质进入水箱并减少实验用水的蒸发。

## 1.2 实验方法

**1.2.1 藻类在净水除杂系统中的生长** 本实验设置 10 个上述系统,系统除支架外所有部件均用 75% 酒精彻底清洗。每种藻类的生长实验设置 3 个平行实验,测量数据取平均值。实验开始通水 30 min 后进行第一次测量,测量时将整个藻板取下,待其不再有水流出时称量质量。每 24 h 称量一次,根据每 24 h 藻板质量差值计算生长率。除空白外,每个藻板上藻类投放量均为  $(30.0\pm 0.1)\text{ g}$ 。实验时光照强度为  $3\ 000\text{ lx}$ ,光照黑暗比为 16 h : 8 h,保持室内温度为  $27\text{ }^\circ\text{C}$ 。每日测定时间均为 08:30。藻类每日生长率( $U$ )计算公式为:

$$U=(M-M_0)/M_0\times 100\% \quad (1)$$

式中, $M$ 为当日藻质量, $M_0$ 为前一日藻质量。

**1.2.2 不同藻类在净水除杂系统中对微塑料拦截效果** 本实验每种藻类设置 27 个上述系统,系统清洗方式同 1.2.1。水绵、刚毛藻使用过滤灭菌养殖尾水进行实验,浒苔使用过滤灭菌海水进行实验。由于实验使用聚丙烯微塑料,密度( $\rho=0.91\text{ g/cm}^3$ )均小于养殖尾水( $\rho=1.01\text{ g/cm}^3$ )和海水( $\rho=1.02\text{ g/cm}^3$ ),所以养殖尾水和海水可直接进行对比。分别设置 2、4 和  $6\text{ g/dm}^2$  3 个水平的藻量,其中, $2\text{ g/dm}^2$  是藻类勉强覆盖藻板的藻量,有一些孔隙和不能完全覆盖的区域; $4\text{ g/dm}^2$  是藻类基本可以将藻板覆盖的藻量,没有明显裸露位置; $6\text{ g/dm}^2$  是藻类可以完全将藻板覆盖的藻量,没有任何孔隙,有些位置会有少量藻类堆积。在每种藻量对应的水箱中分别添加颗粒状、片状和纤维状 3 种形态的聚丙烯微塑料,微塑料添加量均为  $100\text{ items/L}$ 。所有实验进行天数分别为 1、4、7 和 10 d。设置 3 次平行实验。实验结束停水 30 min 后,将水箱中所有液体倒出并用蒸馏水清洗水箱,使用  $2.7\text{ }\mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜(Whatman, GF/D)过滤全部液体(包括清洗时产生的),使用带有电荷耦合装置(CCD)相机的尼

康 SMZ 1500 立体显微镜(日本)来计量滤膜上微塑料个数并计算去除率。微塑料去除率( $\eta$ )计算公式为:

$$\eta=(P-P_0)/P\times 100\% \quad (2)$$

式中, $P$ 为添加微塑料量, $P_0$ 为滤膜中微塑料量。

### 1.2.3 水绵在净水除杂系统中对氮、磷的去除效果

预实验结果显示,水绵对不同形态微塑料的去除效果最好,所以选用水绵作为氮磷去除效果的实验藻类。

设置 4 个上述系统,清洗方式同 1.2.1。分别设置空白、2、4 和  $6\text{ g/dm}^2$  4 个水平的藻量,水箱中加入过滤后的养殖尾水。实验开始并通水后 10 min 取样,取样位置为藻板下端出水口处。第一次取样后每 24 h 取样一次,每次取样后添加相同的养殖尾水补给水分损失。水样采集时间为 09:00,实验进行 15 d。

水样测定:总氮测定采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法(GB 11894-89),总磷测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  测定参考《水和废水检测分析方法(第 4 版)》采用钼锑抗分光光度法进行,使用手持式 pH 快速测量仪(N00399,商丘双洋环保科技有限公司,精度为 0.01)测定水样 pH。

## 1.3 数据处理

选用 IBM SPSS Statistics 27.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和双因素方差分析(two-way ANOVA)检验不同藻类与微塑料去除效果之间的差异性。分析结果使用 Origin Lab 2022 绘图。所有分析均采用 95%的置信度。

## 2 结果

### 2.1 藻类生长效果

实验期间,水绵、刚毛藻和浒苔 3 种藻类均能在实验系统中正常生长(表 2、图 2),均满足了作为系统中吸收水体氮磷、拦截微塑料的基本条件。3 种藻类在实验前 6 d 生长速率较快,9 d 后生长速率逐渐减缓。水绵、刚毛藻和浒苔的日均生长率分别为 2.93%、2.61%和 3.15%。3 种藻类藻质量增加最多的为浒苔。

### 2.2 净水除杂系统微塑料去除率

在本实验中,通过研究净水除杂系统不同运行时间和单位面积不同藻量的条件下对微塑料的去除效果可以得出,藻量为  $2\text{ g/dm}^2$  实验组的 3 种丝状藻对于微塑料的去除率均远低于其余 2 种藻量。在实验时长为 1~4 d 时,3 种丝状藻对微塑料去除率增速较快。当实验时长延长至 7 d、10 d 时,3 种丝状藻对微塑料的去除率仍然有所增加,但增速减慢且趋于平缓。

表 2 藻类生长率随时间的变化/%

Tab.2 Changes in algal growth rate over time/%

时间 Time/d	浒苔 <i>Enteromorpha</i>	水绵 <i>Spirogyra</i>	刚毛藻 <i>Cladophora</i>
1	5.67±1.23	5.00±1.08	2.33±0.31
2	7.57±0.51	5.40±0.67	3.91±0.84
3	4.99±0.42	3.61±0.53	5.64±0.66
4	6.70±0.36	9.01±0.48	5.34±0.27
5	4.97±0.28	4.53±0.24	3.94±0.81
6	5.99±0.89	2.30±0.39	4.07±0.46
7	2.12±0.71	3.49±0.57	2.34±0.18
8	1.15±0.10	1.69±0.11	1.53±0.21
9	1.14±0.55	1.66±0.32	0.75±0.11
10	1.80±0.18	1.86±0.21	1.74±0.23
11	1.55±0.31	1.14±0.27	1.22±0.43
12	0.44±0.15	1.58±0.15	2.17±0.55
13	0.43±0.29	0.67±0.21	2.13±0.35
14	1.30±0.19	1.55±0.28	1.39±0.22
15	1.49±0.20	0.44±0.13	0.68±0.17

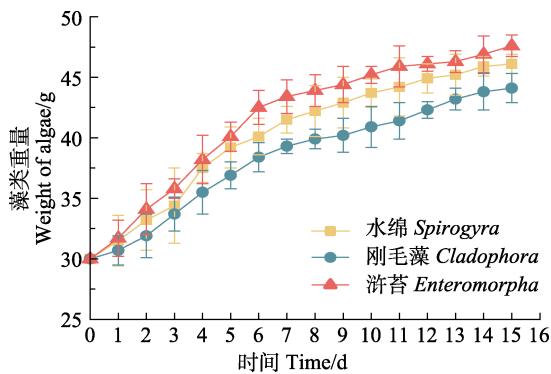


图 2 不同藻类在净水除杂系统中的生长曲线  
Fig.2 Growth curves of different algae in the system

3 种丝状藻对纤维状微塑料的去除效果最佳(图 3c、f、i); 对颗粒状微塑料的去除效果最差(图 3a、d、g)。在时长为 10 d 的实验中, 水绵相较于其他 2 种丝状藻对 3 种不同形态的微塑料均有更高的去除率。10 d 的去除实验中, 水绵藻量为 6 g/dm<sup>2</sup> 的净水除杂系统对 3 种形态微塑料的去除率为整个实验的最大值, 颗粒状、片状和纤维状的去除率分别为 67.50%、71.50% 和 88.50% (图 4a)。对比水绵藻量为 4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组的去除率曲线, 除形态为颗粒状的微塑料外, 对于其他 2 种形态的微塑料的去除率在实验时长 10 d 的实验中比较接近。水绵对颗粒状的微塑料去除率受藻量影响较大(图 3a), 浒苔藻量为 4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组对颗粒状微塑料去除率十分相近。不同藻量对 3 种丝状藻去除片状微塑料的影响较为相似, 去除率曲线形

态相近(图 3b、e、h)。藻量为 4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 组的水绵和浒苔对纤维状微塑料的去除率较为接近(图 3c、i), 藻量为 2 和 4 g/dm<sup>2</sup> 组的刚毛藻去除纤维状塑料的去除率在实验时长为 1 d 和 7 d 的实验中较接近(图 3f)。

对比 3 种藻类对不同形态微塑料的最终去除率, 水绵在所有藻量的实验组中对 3 种形态的微塑料去除率均高于刚毛藻和浒苔(图 4)。刚毛藻对颗粒状、片状和纤维状微塑料的最大去除率分别为 53.00%、65.00% 和 79.50%, 浒苔对颗粒状、片状和纤维状微塑料的最大去除率分别为 55.00%、73.50% 和 75.50%。

综上所述, 就 3 种藻类对不同形态微塑料的去除效果而言, 相较于其他 2 种丝状藻, 水绵更适合用于去除本净水除杂系统中的微塑料。

### 2.3 水绵净水除杂系统对氮、磷的去除效果

净水除杂系统中添加不同水绵藻量的实验组, 对养殖尾水中的 N、P 均有较好的去除效果(图 5a~c)。水绵藻量为 2、4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组进行至 8 d 时, 净水除杂系统对 TN 的去除率分别为 44.71%、69.46% 和 75.97% (表 3), 在这期间, 净水除杂系统对养殖尾水中氮的去除效果最好。8~15 d 时, 逐渐趋于平缓。15 d 实验结束时, 4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组之间对于 TN 平均去除率的差别并不显著( $P=0.692$ ), 但均优于 2 g/dm<sup>2</sup> 实验组。4 g/dm<sup>2</sup> 实验组的去除率为实验的最大值, 达到了 88.23%。

净水除杂系统对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的最大去除率为水绵藻量 6 g/dm<sup>2</sup> 组(90.38%) (图 5b), 但 4 g/dm<sup>2</sup> 水绵组的去除率也达到了 89.50%, 2 组的去除率仅相差 0.82%。并且系统藻量为 4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组之间对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除效果无显著性差异( $P=0.654$ )。15 d 实验结束时, 水绵藻量为 2、4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组对 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 去除率分别为 85.38%、89.50% 和 90.38%。

水绵净水除杂系统对磷的吸附趋势与氮相似, 但去除率略高于氮。水绵藻量为 2、4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组进行至 10 d 时, 净水除杂系统对磷的去除率分别为 65.23%、80.45% 和 84.36% (图 5c)。前 10 d 对水中磷的去除效果显著。水绵藻量为 4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组之间对 TP 去除效果的差别并不显著( $P=0.640$ )。15 d 实验结束时, 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组的去除率为实验的最大值, 达到了 90.33%。

净水除杂系统的运行会影响水体 pH 值(图 5d), 水体 pH 在实验过程中逐渐升高(0~13 d)并趋于平缓(13~15 d)。对实验 15 d 过程中水绵生物量变化和 pH 变化的分析表明, pH 与水绵生物量的相关性极显著( $P<0.01$ )。



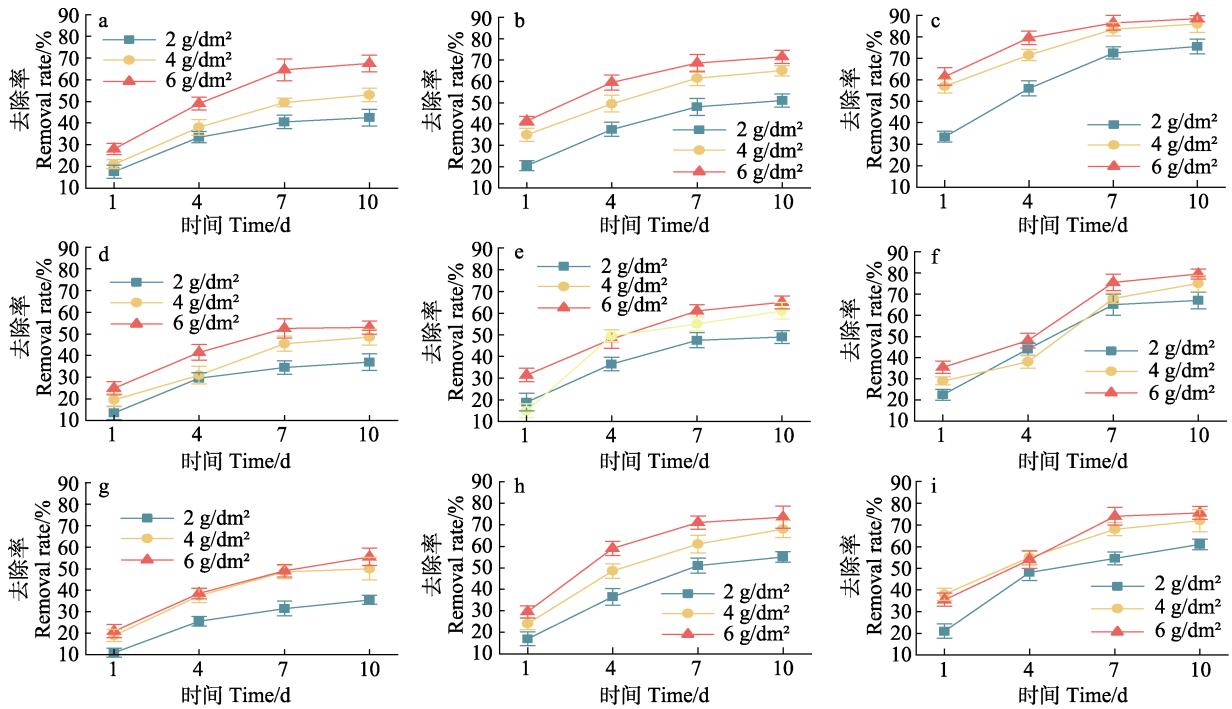


图3 不同时间藻类对微塑料的去除效果

Fig.3 The effect of system operation time on the removal of microplastics by algae

a、b、c 分别为水绵对颗粒状、片状和纤维状微塑料去除效果；d、e、f 分别为刚毛藻对颗粒状、片状和纤维状微塑料去除效果；g、h、i 为浒苔对颗粒状、片状和纤维状微塑料去除效果。

a, b, and c show the removal effects of *Spirogyra* on granular, fragmental and fibrous microplastics, respectively; d, e, and f show the removal effects of *Cladophora* on granular, fragmental and fibrous microplastics, respectively; g, h, and i show the removal effects of *Prolifera* on granular, fragmental, and fibrous microplastics, respectively.

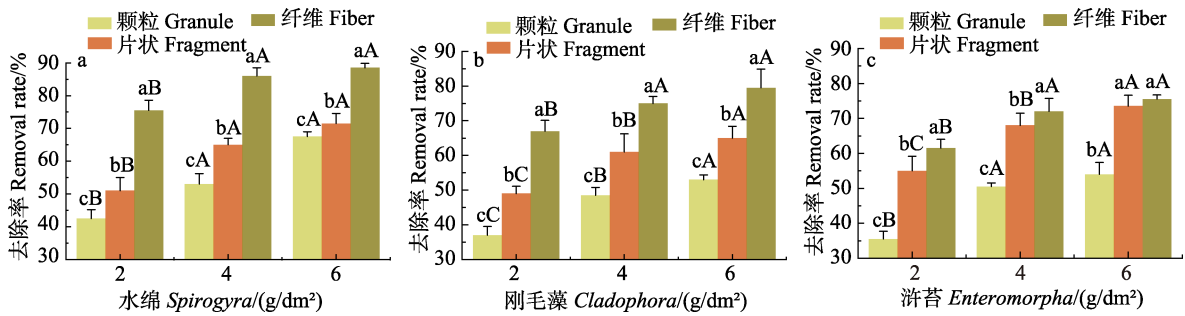


图4 3种藻类对微塑料最终去除效果

Fig.4 Final removal effect of three kinds of algae on microplastics

条形图上方的不同小写字母表示同一形状微塑料不同单位面积藻量之间存在显著差异( $P<0.05$ );

不同的大写字母表示相同单位面积藻量不同形状微塑料之间存在显著差异( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters at the top of the bar graph indicate significant differences ( $P<0.05$ ) between different amount of algae per unit area for the same shape of microplastic, and different uppercase letters indicate significant differences ( $P<0.05$ ) between same amount of algae per unit area for the different shape of microplastic.

实验表明, 2、4 和 6 g/dm<sup>2</sup> 实验组在 15 d 的时间内均可去除 40 L 养殖尾水中 85% 以上的氮、磷, 4 g/dm<sup>2</sup> 的去除效果基本与 6 g/dm<sup>2</sup> 相近。因此, 从系统应用的角度来看, 本净水除杂系统中最佳藻量设置为 4 g/dm<sup>2</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 藻类在净水除杂系统中的生长

3 种藻类在净水除杂系统中经过 15 d 的运行, 都

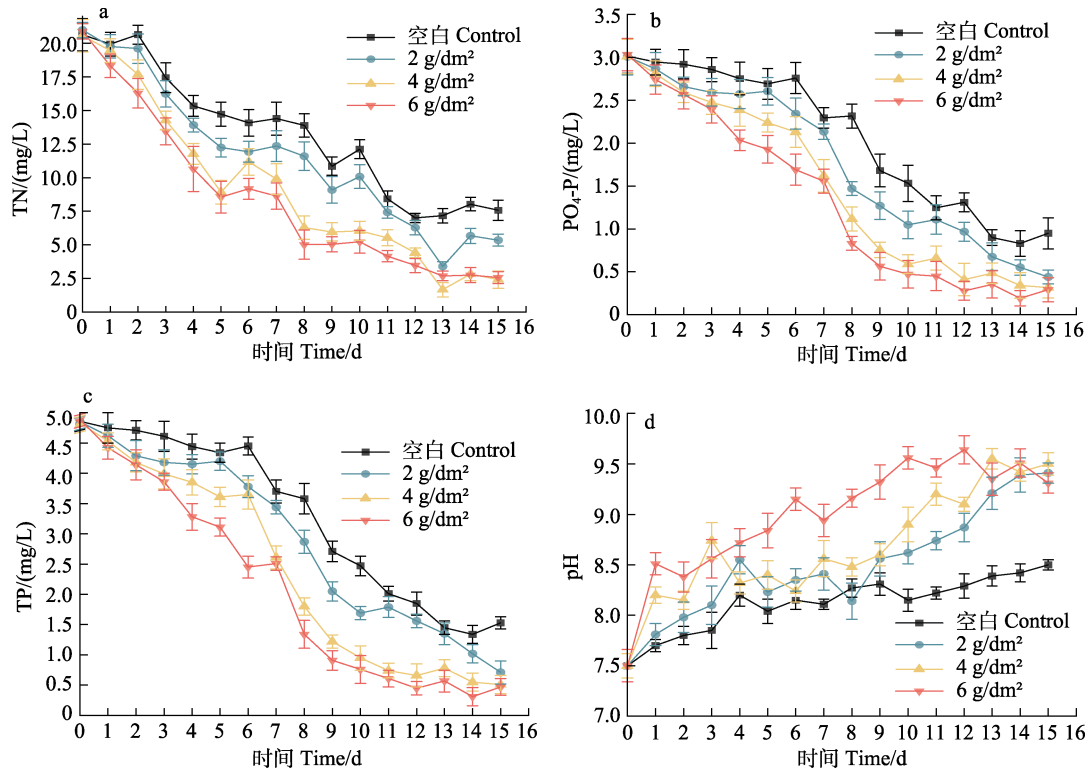


图 5 净水除杂系统中不同藻量的水绵对氮、磷去除效果与对水体 pH 的影响  
Fig.5 Effect of different algae amounts on nitrogen and phosphorus removal and pH in the system

表 3 水绵在净水除杂系统中的氮、磷去除率/%  
Tab.3 Nitrogen and phosphorus removal rate of *Spirogyra* in the system /%

时间 Time/d	TN 去除率 Removal rate of TN				TP 去除率 Removal rate of TP				PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P 去除率 Removal rate of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P			
	空白 Control	2 g/dm <sup>2</sup>	4 g/dm <sup>2</sup>	6 g/dm <sup>2</sup>	空白 Control	2 g/dm <sup>2</sup>	4 g/dm <sup>2</sup>	6 g/dm <sup>2</sup>	空白 Control	2 g/dm <sup>2</sup>	4 g/dm <sup>2</sup>	6 g/dm <sup>2</sup>
1	3.39	5.82	5.40	12.30	2.26	4.74	6.21	9.61	2.16	4.84	6.69	9.56
2	2.58	5.53	8.56	12.88	3.09	11.73	13.99	14.81	2.98	11.63	13.90	15.29
3	3.64	16.63	27.63	32.41	5.14	13.99	17.90	20.58	5.04	13.90	17.81	21.02
4	12.41	29.69	38.23	45.91	8.64	14.61	20.78	32.51	8.54	14.52	20.70	32.88
5	28.65	41.66	56.61	59.07	10.70	13.58	25.72	36.01	10.60	13.49	25.64	36.36
6	31.75	43.14	45.62	56.10	8.44	22.22	24.90	49.59	8.34	22.14	29.24	44.22
7	30.25	41.13	51.85	58.69	23.87	29.22	46.30	48.35	23.79	29.14	46.24	48.64
8	32.67	44.71	69.46	75.97	26.34	40.95	62.96	72.43	23.06	51.18	62.92	72.58
9	47.41	56.67	71.01	75.87	44.24	57.82	74.90	81.28	44.18	57.77	74.87	81.38
10	41.25	51.95	70.57	74.96	49.18	65.23	80.45	84.36	49.12	65.19	80.43	84.45
11	59.14	64.63	73.10	80.09	58.64	63.17	84.77	87.45	58.60	63.13	78.07	85.15
12	66.04	70.05	78.55	83.41	61.93	67.90	86.42	90.74	56.48	67.87	86.41	90.79
13	65.24	83.79	91.88	87.12	70.16	72.22	83.95	88.27	70.13	77.55	83.93	88.34
14	61.10	72.96	86.24	87.10	72.43	79.01	88.68	93.62	72.40	81.67	88.67	93.66
15	63.26	74.50	88.23	87.70	68.52	85.39	89.51	90.33	68.49	85.38	89.50	90.38

仍然可以继续生长, 是本研究后续实验的重要前提。这 3 种藻类都可以在净水除杂系统运行时稳定生长, 这意味着本实验构建的净水除杂系统可以适应不同藻类的生长需求, 提供稳定的环境和条件。藻类的稳

定生长还可以减少系统的波动性, 维持系统的稳定性和运行效果。

水绵、刚毛藻和浒苔的生命周期、生长速率和需求存在一定差异, 每种藻类的正常生长可以更灵活地

管理系统的运行。水绵由于其藻体结构,其比表面积比其他水生植物大得多。水绵的生长速率也略快于其他水生植物。水绵由于可以诱导羟基磷灰石沉积,其同化吸磷速率也快于水生植物(马军等, 2008)。刚毛藻分布广泛,对环境适应力强,油脂含量高。刚毛藻细胞内脂类含量丰富,可达到自身干质量的 10%~70% (杜娟娟等, 2019),产油潜力巨大,经济开发前景广阔。由于海洋富营养化,导致浒苔在夏季黄海海域大量繁殖。由于浒苔生长迅速,富含碳水化合物,其作为生物能源比微藻更具有价格优势(Gao G *et al.*, 2020)。实验构建净水除杂系统可以根据不同环境、不同条件和经济效益调整藻类的种类,从而使净水除杂系统可以应用在更多不同的场景中。

### 3.2 净水除杂系统对微塑料的去除效果评估

目前已经有一些研究表明,大型藻类对微塑料有一定的富集能力。在对同一片海域不同海藻的微塑料富集研究中发现,浒苔的微塑料富集能力最强,其富集的微塑料是周围海水平均含量的 1 000 倍甚至 10 000 倍以上(Gao F *et al.*, 2020; Feng *et al.*, 2020)。对北美五大湖的微塑料研究发现,刚毛藻内的微塑料丰度也能达到周围水体平均微塑料丰富的 10 000 倍(Peller *et al.*, 2021)。大型藻类例如水绵富集的微塑料主要以纤维状为主,由于丝状藻具有细长和分支的藻体,可以更好地卷曲缠绕住同样细长的纤维状微塑料。浒苔的气囊膨胀时,会形成一段长条形中空区域,宽度最大达到数厘米,因此,微塑料可能会被包裹其中。这种拦截的方式相对牢固,微塑料不易脱落(Feng *et al.*, 2020)。本实验的 3 种丝状藻对纤维状微塑料也有相似的结果。对刚毛藻拦截微塑料的研究表明,长度为 1 cm 的刚毛藻藻丝表面积达到 119 cm<sup>2</sup>,且其表面有网状结构(Peller *et al.*, 2021),巨大的比表面积和复杂的表面结构致使刚毛藻对微塑料也具有较好的拦截效果。

研究表明,在东中国海中最主要的微塑料形态即为纤维状,且渔业活动是纤维状微塑料的来源之一(陈永平等, 2023)。本研究发现,本净水除杂系统的 3 种丝状藻对纤维状微塑料在净水除杂系统运行时长为 10 d 时均有较好的去除效果。微塑料的平均去除效果与净水除杂系统运行时长呈正相关。产生这种结果的原因可能是在水箱中微塑料的分布并不均匀,有些微塑料并没有随着时间的推移较早地加入系统水循环中。而且有些微塑料可能跟随水流从藻类上方越过,并未接触或短暂接触到藻体,导致无法被藻体拦截,又重新进入至水箱中。3 种藻类在净水除杂系统中均会逐渐生长,但水绵藻体在净水除杂系统中垂直

投影面积会逐渐增大,藻丝之间孔隙加大。整体来看,其藻体会变得蓬松,对于微塑料的拦截效果会更好。

### 3.3 净水除杂系统对氮、磷去除效果分析

水生植物可以通过光合作用将水体中不同形态的氮化合物作为氮源进行自养生长代谢,被吸收的硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐合成藻细胞氨基酸和蛋白质等物质。在本净水除杂系统中,4 g/dm<sup>2</sup>和 6 g/dm<sup>2</sup>实验组对氮的最大去除率均达到了 85%以上,分别为 88.23%和 87.70%,可以有效去除养殖尾水中的氮。之前有研究设计了一种周丛藻类水质处理槽,研究周丛藻类对水体氮、磷污染物质去除效果,其系统对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的最大去除率为 88.52%,对 TN 的最大去除率为 65%以上(梁霞等, 2008b),与本研究结果相似。

在之前的水生植物除磷研究中,证明除了植物直接吸收水中磷之外,还可通过光合作用升高水体 pH 加速 CaCO<sub>3</sub> 沉淀,并诱导钙磷共沉积,从而间接降低水中的磷含量(Reddy *et al.*, 1987; McConnaughey *et al.*, 1994)。藻类生长时,消耗水体中的 CO<sub>2</sub>,导致水体 pH 升高,也会导致钙磷共沉积。水绵生长后藻量增加,光合作用消耗 CO<sub>2</sub> 的量增加。实验开始时,养殖尾水中的 CO<sub>2</sub> 浓度较高,植物可以通过酶的作用将 CO<sub>2</sub> 直接吸收并用于光合作用,因此,水体 pH 逐渐升高。实验进行至 13 d 时, pH 和光合作用达到平衡并保持相对稳定。对藻生物膜诱导沉积磷的研究结果表明,沉积主要发生在藻生物膜上(Hartley *et al.*, 1996)。水绵比表面积较大,与藻生物膜相似,诱导钙磷沉积主要发生在水绵藻体上。在本净水除杂系统中也有相似的现象,3 个实验组水体 pH 都逐步上升,说明本实验中可能也存在钙磷共沉积现象,从而加速净水除杂系统对水中磷的去除效率。由图 5c 可以得出,5 d 前,系统 2 g/dm<sup>2</sup>和 4 g/dm<sup>2</sup>实验组对磷的去除速率较低,对磷的去除率只有 13.58%和 25.72%。其原因可能是这 2 组的生物量较少,导致藻类生物膜面积较小,由于藻类先使 CaCO<sub>3</sub> 结晶在其藻膜上沉积,然后 CaCO<sub>3</sub> 结晶可作为晶核导致 Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 或 Ca<sub>5</sub>(OH)(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 进行沉积(Li *et al.*, 2021),但 CaCO<sub>3</sub> 结晶沉积需要一定时间来完成,并且由于光合作用速率限制,水体 pH 无法快速升高,也减缓了 CaCO<sub>3</sub> 结晶沉积的速度。这些因素都限制了 2 g/dm<sup>2</sup>和 4 g/dm<sup>2</sup>实验组对磷的去除速率。随着时间的推移, CaCO<sub>3</sub> 晶核逐渐形成,为钙磷共沉积提供先决条件,去除速率逐渐升高。

综合 2、4 和 6 g/dm<sup>2</sup>实验组的实验结果可知,4 g/dm<sup>2</sup> 的单位面积藻量是本净水除杂系统去除氮、磷最适宜的藻量。

## 4 结论

本实验通过构建一种藻类净水除杂系统,可以与水绵、刚毛藻和浒苔 3 种藻类相适配,以满足不同的应用场景。净水除杂系统对于 3 种形态的微塑料均有较好的去除效果,纤维状微塑料作为水产养殖环境中最常见的一种微塑料,在稳定运行后,本系统可有效去除养殖尾水中的微塑料。将水绵作为系统去除养殖尾水氮、磷的实验藻体后,得出本系统对水体氮、磷都有较高的去除率,对氮的最大去除率为 91.88% (系统藻量为  $4 \text{ g/dm}^2$ ); 对磷的最大去除率为 90.33% (系统藻量为  $6 \text{ g/dm}^2$ ); 4 和  $6 \text{ g/dm}^2$  实验组对氮、磷的去除效果相差并不显著,因此,从对微塑料和氮磷的去除效果得知,  $4 \text{ g/dm}^2$  的单位面积藻量是本净水除杂系统中最适宜的藻量。本藻类净水除杂系统操作简单,具有较好的氮、磷去除效果,还可以去除养殖尾水中的微塑料,减轻微塑料污染。因此,该藻类净水除杂系统可以在不同养殖模式的养殖尾水处理系统中复合应用。

## 参 考 文 献

- CARLOS S. Beyond sustainability: Transforming industrial zero-valued residues into increasing economic returns. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131: 376–386
- CARPENTER E J, ANDERSON S J, HARVEY G R, *et al.* Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*, 1972, 178(4062): 749–750
- CHEN Y P, JIANG L, XU C Y, *et al.* Distribution characteristics and sources of microplastics in surface seawater of the East China Sea. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(2): 315–325 [陈永平, 姜璐, 许春阳, 等. 东中国海表层海水微塑料分布特征及其来源综述. *海洋环境科学*, 2023, 42(2): 315–325]
- COURTENE-JONES W, VAN GENNIP S, PENICAUD J, *et al.* Synthetic microplastic abundance and composition along a longitudinal gradient traversing the subtropical gyre in the North Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 185(Pt B): 114371
- CUI J Y, XU H L, CUI Y F, *et al.* Improved eutrophication model with flow velocity-influence function and application for algal bloom control in a reservoir in East China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 348: 119209
- DING J, SUN C, HE C, *et al.* Atmospheric microplastics in the Northwestern Pacific Ocean: Distribution, source, and deposition. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154337
- DU J J, LI F C. Experimental study on removal effect of nitrogen and phosphorus from *Cladophora* and its cultivation methods. *Water Resources Development and Management*, 2019(12): 35–38, 48 [杜娟娟, 李粉婵. 刚毛藻氮磷去除效果与培养方式试验研究. *水资源开发与管理*, 2019(12): 35–38, 48]
- EMENIKE E C, OKORIE C J, OJEYEMI T, *et al.* From oceans to dinner plates: The impact of microplastics on human health. *Heliyon*, 2023, 9(10): e20440
- FENG Z H, ZHANG T, SHI H, *et al.* Microplastics in bloom-forming macroalgae: Distribution, characteristics and impacts. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 397: 122752
- GAO F, LI J, HU J, *et al.* Occurrence of microplastics carried on *Ulva prolifera* from the Yellow Sea, China. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2020(2): 100054
- GAO G, BURGESS G J, WU M, *et al.* Using macroalgae as biofuel: Current opportunities and challenges. *Botanica Marina*, 2020, 63(4): 355–370
- GENG X, BOUFADEL M C, LOPEZ E P. Modeling impacts of river hydrodynamics on fate and transport of microplastics in riverine environments. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 196: 115602
- GUO L L, DAI L L, ZHENG J L, *et al.* Environmental factors associated with the filamentous green algae *Cladophora* blooms: A mesocosm experiment in a shallow eutrophic lake. *Journal of Environmental Management*, 2022, 313: 114977
- HARTLEY A M, HOUSE W A, LEADBEATER B S C, *et al.* The use of microelectrodes to study the precipitation of calcite upon algal biofilms. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, 183(2): 498–505
- IKENOUE T, NAKAJIMA R, FUJIWARA A, *et al.* Horizontal distribution of surface microplastic concentrations and water-column microplastic inventories in the Chukchi Sea, western Arctic Ocean. *Science of the Total Environment*, 2023, 855: 159564
- KALČÍKOVÁ G. Beyond ingestion: Adhesion of microplastics to aquatic organisms. *Aquatic Toxicology*, 2023, 258: 106480
- LAW K L, MORÉT-FERGUSON S E, GOODWIN D S, *et al.* Distribution of surface plastic debris in the eastern Pacific Ocean from an 11-year data set. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(9): 4732–4738
- LAWTON R J, COLE A J, ROBERTS D A, *et al.* The industrial ecology of freshwater macroalgae for biomass applications. *Algal Research*, 2016, 24(Part B): 486–491
- LI N W, LAI B, DING L S, *et al.* Synchronous algae and phosphorus removal by Ceramsite@Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (FC) via taking the algae as crystal nuclei of hydroxylapatite. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426(1): 130748
- LIANG X, LI X P, SHI Y J. Nutrient removal from contaminated river water using a periphyton water treatment system. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008b(4): 695–704 [梁霞, 李小平, 史雅娟. 周丛藻类水质处理系统中氮、磷污染物去除效果研究. *环境科学学报*, 2008b(4): 695–704]
- LIANG X, LI X P. Treatment of polluted urban river water using filamentous green algae. *Environmental Science*, 2008a, 29(1): 52–57 [梁霞, 李小平. 大型丝状绿藻去除城市水体污染物质的研究. *环境科学*, 2008a, 29(1): 52–57]
- MA J, LEI G Y. Characteristics of phosphorus removal and growth inhibition of micro-algal species by *Spirogyra*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 476–483 [马军, 雷



- 国元. 水绵(*Spirogyra*)的除磷特性及其对微藻生长的抑制作用. 环境科学学报, 2008, 28(3): 476–483]
- MARIA M, STÉPHANIE R, JEAN-LUC G, *et al.* Characteristics, fate, and impact of marine plastic debris exposed to sunlight: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 171: 112701
- MCCONNAUSHEY T A, LABAUGH J W, ROSENBERRY D O, *et al.* Carbon budget for a groundwater-fed lake: Calcification supports summer photosynthesis. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39: 1319–1332
- PELLER J, NEVERS M B, BYAPPANAHALLI M. *et al.* Sequestration of microfibers and other microplastics by green algae, *Cladophora*, in the US Great Lakes. *Environmental Pollution*, 2021, 276: 116695
- REDDY K R, TUCKER J C, DEBUSK W F. The role of *Egeria* in removing nitrogen and phosphorus from nutrient-enriched waters. *Journal of Aquatic Plant Management*, 1987, 25: 14–19
- SONG K X, HE J C, LI C W, *et al.* Characteristics of microplastic pollution in sediment of silty coast in culture bay. *Environmental Science*, 2023, DOI: 10.13227/j.hjcx.202305121 [宋可心, 贺金成, 李昌文, 等. 养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征. 环境科学, 2023, DOI: 10.13227/j.hjcx.202305121]
- THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, *et al.* Lost at Sea: Where is all the plastic? *Science*, 2004, 304(5672): 838
- YU F, PEI Y Z, ZHANG X C, *et al.* Occurrence and distribution characteristics of aged microplastics in the surface water, sediment, and crabs of the aquaculture pond in the Yangtze River Delta of China. *Science of the Total Environment*, 2023, 871: 162039
- ZHANG T, SUN Z Y, LIU Y, *et al.* Occurrence of microplastic pollution in coastal wetlands: A typical rare wildlife sanctuary in China. *Regional Studies in Marine Science*, 2023, 67: 103176
- ZHAO C, LI W, SHANG D, *et al.* Influence of nitrogen sources on wastewater treatment performance by filamentous algae in constructed wetland system. *Environmental Research*, 2023, 235: 116638

(编辑 冯小花)

## An Algae Water Purification and Decontamination System That Removes Microplastics, Nitrogen and Phosphorus

LIU Zishuo<sup>1</sup>, LIU Shiwei<sup>1</sup>, YANG Yuxiang<sup>1</sup>, JIN Wei<sup>1</sup>, MA Xiaona<sup>1,2</sup>, FENG Zhihua<sup>1,2</sup>①

(1. Jiangsu Key Laboratory of Marine Bioresources and Environment, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China; 2. Co-Innovation Center of Jiangsu Marine Bio-Industry Technology, Key Laboratory of Coastal Salt Marsh Ecology and Resources, Ministry of Natural Resources, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

**Abstract** Microplastic pollution and excessive discharge of aquaculture tailwater have become important global issues. The use of filamentous algae to remove nitrogen, phosphorus, and microplastics in the same system has not been reported. In this study, we constructed an algal water purification and removal system and investigated its ability to remove microplastics, nitrogen, and phosphorus from the water column. Three kinds of filamentous algae were used, *Spirogyra*, *Enteromorpha*, and *Cladophora*, in microplastic removal experiments in the system; the three species of filamentous algae were the most effective in removing fibrous microplastics (88.50%, 79.50%, 75.50%) and the least effective in removing granular microplastics (67.50%, 53.00%, 55.00%), respectively. *Spirogyra* removed microplastics better than the other two algae; therefore, it was used for nitrogen and phosphorus removal experiments in the water column. The density of algae per unit area was set to 0 (control), 2, 4, and 6 g/dm<sup>2</sup>. *Spirogyra* showed a Total Nitrogen removal rate of 91.88% (4 g/dm<sup>2</sup>), a Total Phosphorus removal rate of 90.33% (6 g/dm<sup>2</sup>), and a PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P removal rate of 90.38% (6 g/dm<sup>2</sup>) after 15 d. The density of 4 g/dm<sup>2</sup> showed the highest removal rate, 90.38%. There were no significant differences between the experimental results of the 4 and 6 g/dm<sup>2</sup> groups ( $P > 0.05$ ). The results showed that the system effectively removed fibrous microplastics and absorbed nitrogen and phosphorus from the water body and that an algal density per unit area of 4 g/dm<sup>2</sup> was the most suitable for removing nitrogen and phosphorus in this system.

**Key words** Microplastics; Aquaculture tailwater; Filamentous algae; Water purification and decontamination system

① Corresponding author: FENG Zhihua, E-mail: fengzhihua@jou.edu.cn