

曝气扰动下浮萍生物量对附着硅藻生长的影响

潘恒丰^{1,2}, 王小冬^{1*}, 车 轩¹, 王 洪^{1,2}, 李一鸣³, 程翔宇^{1,2}, 刘兴国¹

1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 2. 上海海洋大学, 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业农村部低洼盐碱地水产养殖重点实验室, 盐碱水域渔业工程技术研究中心, 上海 200090

摘要:

【目的】利用腐烂状态的浮萍培养附着态生长的硅藻, 验证“腐烂状态的浮萍不但可以作为硅藻附着生长的基质, 而且曝气扰动条件下浮萍的生物量会影响硅藻的附着生长”科学假说。

【方法】使用不同生物量的腐烂状态浮萍在曝气扰动下进行培养实验。按腐烂浮萍的湿重梯度设置 5 个处理组: 0、4、8、12、14 g/L, 处理编号依次为 I、II、III、IV、V, 每个处理组 3 个重复。

【结果】各处理组均未出现缺氧情况; 处理组 I 的氨氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) (0.584 ± 0.649 mg/L) 和活性磷 (SRP) (0.336 ± 0.274 mg/L) 浓度均显著高于其他处理组。各处理组可溶性总氮 (DTN) 和可溶性总磷 (DTP) 均呈下降趋势并保持相对稳定, 处理 V 的 DTN、DTP 平均浓度最高, 分别为 (1.665 ± 1.678) 和 (0.603 ± 0.672) mg/L, 但各处理之间的 DTN、DTP 浓度均无显著差异。实验中后期, 腐烂状态的浮萍叶表面出现大量舟形藻属和卵形藻属硅藻附着生长, 其中处理组 IV 的附着硅藻湿重最高, 在第 35 天达到最大值 249.13 mg/L。且浮萍叶表面的附着硅藻的最大生物量显著高于玻璃片上的。

【结论】在曝气扰动下, 腐烂状态的浮萍湿重在 12 g/L 时更有利于附着硅藻生长, 浮萍较玻璃片更有利于硅藻附着生长。腐烂状态的浮萍释放了氮、磷等营养盐, 为硅藻生长提供物质基础, 同时浮萍也是硅藻附着生长的介质。本实验提供了一种在曝气扰动下利用腐烂状态的浮萍培养附着硅藻的方法, 拓展了附着硅藻的培养方法。

关键词: 浮萍; 附着硅藻; 曝气扰动; 营养盐

硅藻 (Bacillariophyta) 是水体重要的藻类, 尤其在早春和晚秋占据优势^[1], 是水体主要的初级生产者^[2]。与蓝藻 (Cyanophyta) 相比, 硅藻的营养价值大, 硅藻的大小以及营养成分易被浮游动物摄食并消化吸收^[3], 同时也是水产养殖的重要生物饵料^[4]。因此, 硅藻的高密度培养是水产养殖的一个重要研究方向。



第一作者: 潘恒丰, 从事水环境调控研究, E-mail: 1754416414@qq.com



通信作者: 王小冬, 从事水生态环境与工程研究, E-mail: wangxiaodong@fmiri.ac.cn



资助项目: 国家淡水水产种质资源库 (FGRC: 18537); 国家重点研发计划“蓝色粮仓”重点专项 (2019YFD0900305); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2023TD67)

收稿日期: 2023-08-09

修回日期: 2023-11-15

文章编号:

1000-0615(2025)06-069617-12

中图分类号: S 968.4

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



硅藻根据生态类型可以分为浮游生长和附着生长, 附着生长的硅藻又称为着生硅藻或周丛硅藻。水生植物上可以附着生长大量藻类, 在对淀山湖沉水植物上着生藻类群落的调查显示, 物种组成以硅藻门和绿藻门 (Chlorophyta) 为主, 其次是蓝藻门, 此外还有裸藻门 (Euglenophyta)、金藻门 (Chrysophyta) 和隐藻门 (Cryptophyta) 等^[5]。研究表明超过 80% 的滨岸水生植物表面都有藻类附着生长^[6]。苏胜齐等^[7]研究发现, 菹草 (*Potamogeton crispus*) 不同生长时期表面附着藻类的密度和生物量排序为衰亡期>幼苗期>成熟期>生长期。其中原因可能是叶片处于衰败阶段时释放了营养盐, 附植藻类可以吸收这些营养物质以促进自身生长。而水生植物死亡后腐烂, 会消耗水体氧气、改变水体的理化性质, 同时释放大量营养盐, 造成水体富营养化^[8]。附着藻类中以硅藻占优势居多, 常见附着硅藻有曲壳藻属 (*Achnanthes*)、异极藻属 (*Gomphonema*)、卵形藻属 (*Cocconeis*)、舟形藻属 (*Navicula*)、菱形藻属 (*Nitzschia*)、双眉藻属 (*Amphora*)、针杆藻属 (*Synedra*) 和直链藻属 (*Melosira*) 等^[9-11]。因此, 如果可以利用腐烂状态的水生植物培养附着藻类尤其是硅藻, 即具有了通过循环利用营养盐达到控制水体富营养化和培养硅藻的双重意义。

对植物表面附着藻类的研究主要针对活的植物^[12], 很少针对已经死亡和出现腐烂的植物^[7]。且已有研究表明, 对合适浓度的蓝藻水华如微囊藻 (*Microcystis*) 水华进行曝气扰动时, 微囊藻群体形成的细颗粒上会出现硅藻附着生长^[13], 即出现蓝藻向硅藻的演替, 其中的机制与微囊藻群体形成的细颗粒在腐烂过程中释放营养盐, 以及悬浮的微囊藻细颗粒为硅藻附着生长提供介质有关。浮萍 (*Lemna minor*) 是一种飘浮性水生植物, 浮萍叶 (叶状体) 一般长 1.5~5.0 mm, 宽 2~3 mm。浮萍腐烂后可以释放营养盐, 并且在合适的扰动条件下可以悬浮于水中, 这类似于蓝藻细颗粒在水动力扰动下的情况。因此推测, 腐烂状态的浮萍不仅可以提供营养盐, 还可以为藻类的附着生长提供附着介质。本研究利用腐烂状态的浮萍进行附着硅藻的培养, 以验证腐烂浮萍可以作为硅藻附着生长的基质, 并且浮萍的生物量会影响硅藻的附着生长。

1 材料与方法

1.1 实验设计

2022 年 6 月 28 日捞取在玻璃温室的水槽中培养的浮萍, 堆积在一个 10 L 广口玻璃瓶中腐烂, 浮萍堆积腐烂期间添加适量自来水, 以将浮萍浸泡, 实现浮萍腐烂并释放营养盐。浮萍的生物量以湿重表示。2022 年 7 月 21 日将已经堆积腐烂 24 d 的浮萍用 80 目滤网过滤、沥水, 按照沥水后腐烂浮萍的湿重 (0、4、8、12、14 g/L) 分为 5 个处理, 从低到高依次编号 I、II、III、IV、V, 每个处理 3 个重复, 其中处理组 I 为对照, 不添加腐烂浮萍。在 10 L 的无色广口玻璃瓶中进行实验。沥水后腐烂浮萍的含水率为 95% (于 105 °C 烘干)。腐烂浮萍经 80 目过滤后的浸泡液与自来水混合后作为各处理组的培养液。实验在玻璃温室中进行, 于 2022 年 9 月 9 日结束, 历时 51 d。

实验期间不额外补充营养盐。但由于水分蒸发较快, 每个玻璃瓶每 2 天补充自来水至 10 L 水位线处。每个实验瓶均使用连接在空气泵上的气泡石进行空气曝气, 曝气量为 0.45 m³/h, 以维持浮萍叶尽量悬浮在水中。同时, 每个实验瓶中用细棉线悬挂 4 片相同规格的无色透明玻璃片, 其规格为 75 mm×15 mm, 厚度为 1 mm。玻璃片垂直浸没在水下 20 cm 处, 用于附着硅藻。

1.2 理化指标测定

实验期间每 2 天 8:00、14:00 测定水温 (WT)、溶解氧 (DO)、pH、盐度 (S); 每 7 天测定 1 次氨氮 (NH₄⁺-N)、活性磷 (SRP)、溶解性总氮 (DTN)、溶解性总磷 (DTP)、总悬浮颗粒物 (TSS) 和有机悬浮颗粒物 (OSS)。

WT、pH、DO 和 S 采用多参数水质分析仪 YSI professional plus (Yellow Spring Instruments, 美国) 原位测定。NH₄⁺-N、SRP、DTN、DTP 的测定为水样过 Whatman GF/F 滤膜 (0.7 μm 孔径, 英国) 后, 采用纳氏试剂光度法测 NH₄⁺-N、钼锑抗分光光度法测 SRP^[14], 采用碱性过硫酸钾联合消解法同时测定 DTN、DTP^[15]。TSS 采用 105 °C 烘干的重量法测定^[13], OSS 选择在 450 °C 烧失量的重量法测定。

1.3 藻类样品的采集、处理与计算

选取每处理组 3 个平行的等体积混合水样来采集浮萍上的附着藻类。使用振荡器(功率为 0.3 W, 50~60 Hz)振荡混合水样 2 min, 促使浮萍上附着藻类脱落, 便于计数。处理组 I 即对照组中, 由于未添加浮萍, 因此只计数玻璃片上附着的硅藻, 使用干净的牙刷将玻璃片上附着物刷下, 边刷边用蒸馏水冲洗以确保采集完全, 定容后用 1% 的鲁哥氏液固定、保存。

藻类计数采用 0.1 mL 计数框, 于 Olympus CX31 显微镜下进行, 藻类的鉴定参已有考文献^[16]。藻类生物量以湿重表示。藻类细胞大小通过测量至少 30 个细胞相关尺寸并转化为最相近的简单几何体体积后进行估算^[17]。藻类湿重计算时设定 1 mm³ 体积等于 1 mg 湿重。

1.4 数据分析

各处理间数据的比较采用软件 SPSS 16.0 的一般线性分析模型 (General Linear Model) 中的单因素方差分析 (ANOVA)。对各处理组 WT、DO、S、pH、NH₄⁺-N、SRP、DTN、DTP、TSS、OSS、DTN/DTP、OSS/TSS 进行比较时, 先开平方以增加数据齐性, 采用 LSD 法进行验后比较, 差异显著水平选择 $P < 0.05$ 。采用软件 Origin 2021 作图, 作图中的数据采用平均值±标准差 (mean±SD) 或平均值表示。

2 结果

2.1 WT、S、pH 和 DO 的测定

实验期间各指标波动范围: WT 为 25.5~36.9 °C、S 为 0.17~0.22、pH 为 7.22~9.23、DO 值 4.63~6.94 mg/L(图 1)。方差分析结果显示, 无论是 8:00 和 14:00, 各处理组间的 pH 值均有显著差异 ($P < 0.05$), 且由高到低排序为 V>IV>III>II>I。在 8:00 和 14:00, 处理组 II 和 III 的 S 均显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。8:00 时, 处理组 I 的 DO 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$); 14:00 时, 各处理组间 DO 均无显著差异 ($P > 0.05$)(图 1)。

2.2 营养盐和悬浮物指标

方差分析结果显示, 处理组 I 的 NH₄⁺-N、

SRP 浓度显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 但其他 4 个处理组间无显著差异; 各处理组 DTN、DTP 均呈下降趋势并逐渐保持相对稳定, 处理 V 的 DTN、DTP 平均浓度最大, 分别为 (1.665±1.678)、(0.603±0.672) mg/L, 但各处理组间 DTN 和 DTP 浓度均无显著差异; TSS 和 OSS 在所有处理组之间均有显著差异 ($P < 0.05$), 浓度从高到低依次为 V>IV>III>II>I (图 2)。

各处理间 DTN/DTP 不存在显著差异 ($P > 0.05$)。处理 IV 的 OSS/TSS 均显著低于处理 I、II、III ($P < 0.05$) (图 3)。

2.3 附着硅藻

实验初始时, 腐烂状态的浮萍上未发现明显的附着藻类, 初始的附着藻类生物量视为 0。实验过程中, 各处理组浮萍上附着硅藻的密度和生物量基本均呈先上升后下降的趋势 (图 4)。各处理组浮萍上的附着硅藻密度和生物量均有显著差异 ($P < 0.05$), 从高到低排序为 IV>V>III>II>I。

处理 II 中出现的硅藻共有 8 个属 (表 1), 生物量最大的为舟形藻和卵形藻 2 个属, 总生物量最高值为 97.04 mg/L, 出现在第 35 天。

处理 III 中出现的硅藻共有 10 个属 (表 2), 生物量最大的同样是舟形藻和卵形藻 2 个属, 其中舟形藻的生物量占总生物量的比值超过 50%; 总生物量最高值为 116.23 mg/L, 同样出现在第 35 天。

处理 IV 中出现的硅藻共有 7 个属 (表 3), 生物量最大的舟形藻属占比超过总生物量的 50%, 其次是卵形藻属; 总生物量的最高值为 249.13 mg/L, 出现在第 35 天。

处理 V 中出现的硅藻共有 8 个属 (表 4), 生物量最大的同样是舟形藻属, 生物量占比超过总生物量的 50%, 其次是卵形藻属; 总生物量的最高值为 172.88 mg/L, 同样出现在第 35 天。

玻璃片上的附着硅藻的密度及生物量变化趋势显示, 各处理玻璃片上的附着硅藻密度和生物量基本呈先上升后下降的趋势; 方差分析表明, 处理组 I 显著低于其他处理组 ($P < 0.05$), 处理组 IV 则显著高于其他处理组 ($P < 0.05$); 且玻璃片上的附着硅藻生物量显著低于浮萍 ($P < 0.05$)(图 5)。

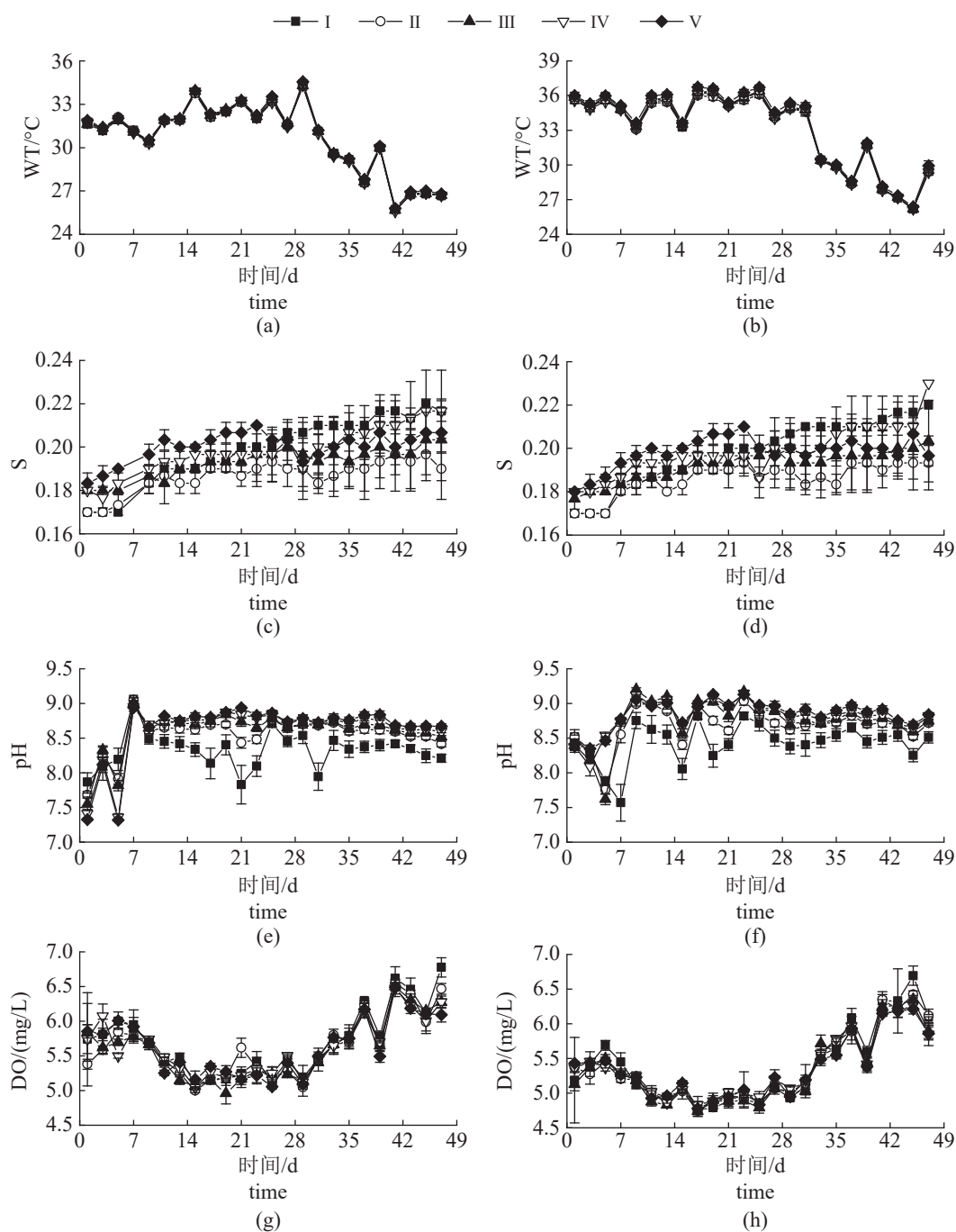


图1 各处理组 8:00 (左) 和 14:00 (右) 各指标变化

Fig. 1 Diurnal variations of measured parameters at 8:00 (left) and 14:00 (right) of each treatment

(a) (b) WT, (c) (d) S, (e) (f) pH, (g) (h) DO.

3 讨论

已有大量关于附着藻类的研究, 营养盐、光照、附着介质等多种因素会影响附着藻类的生物量和种类组成^[18-22]。硅藻是常见的附着藻类, 在浮游植物和无机物引起的浑水型湖泊中, 出现的附着藻类均以硅藻为优势^[23], 并且附着

藻类中硅藻所占比例通常高于浮游藻类中硅藻的占比^[13]。由于附着硅藻对水产养殖具有好的生物饵料价值, 研究附着硅藻的培养在水产养殖中具有重要意义^[24]。

附着硅藻的生长需要营养盐, 丰富的氮、磷是促使附着硅藻大量生长的主要因素^[25]。对大型水生植物上附着生物的研究表明, 大型水

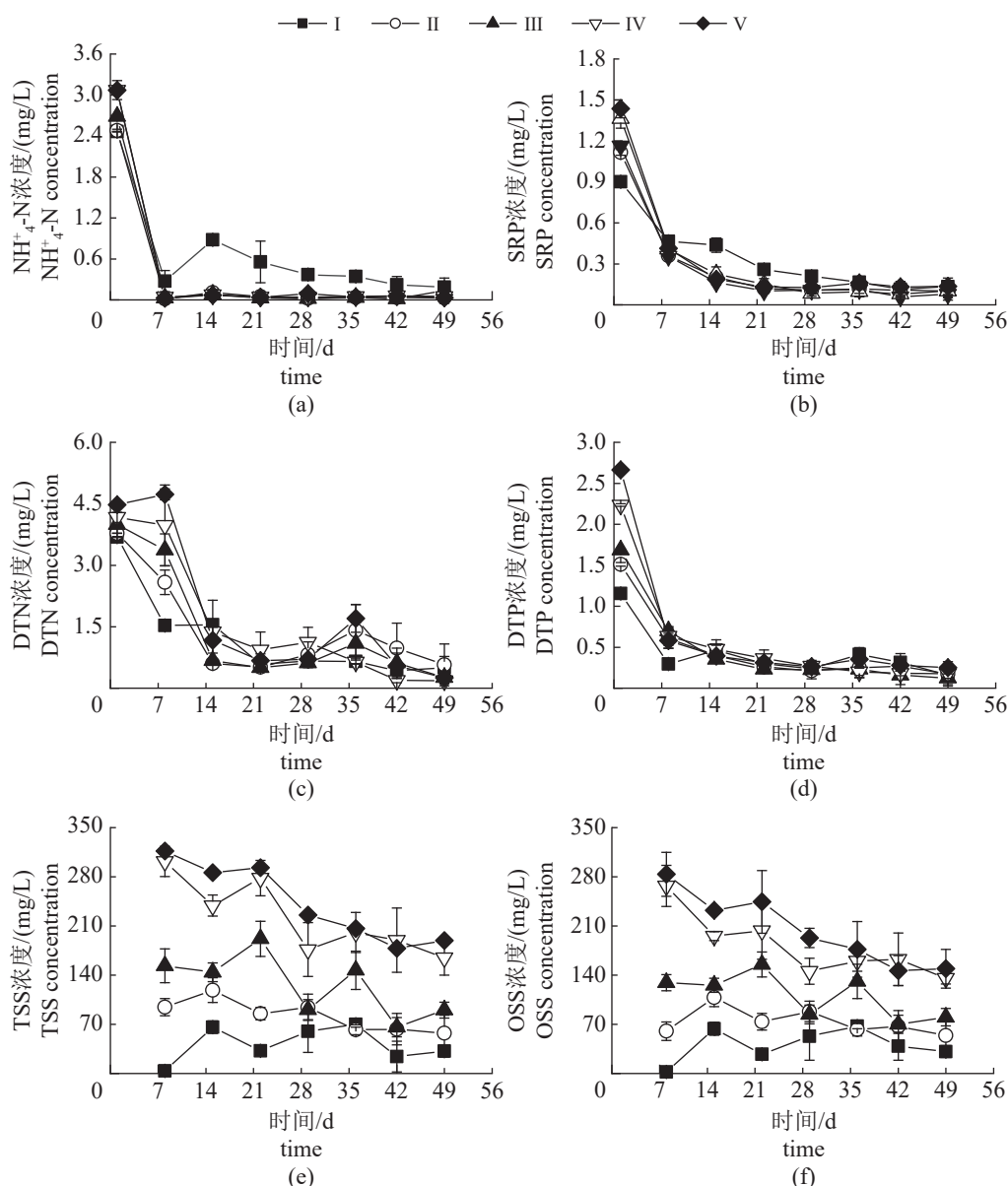


图2 各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a)、SRP (b)、DTN (c)、DTP (d)、TSS (e) 和 OSS (f) 浓度随时间的变化

Fig. 2 The changes in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a), SRP (b), DTN (c), DTP (d), TSS (e) and OSS (f) of each treatment

生植物释放的营养盐或者有机物可能促进附着生物生长^[26]。湖泊中氮的添加往往引起附着生物的生物量增加^[27-28]。附着生物或者附着藻类的生物量受营养盐水平的影响^[29-30]。本实验中附着硅藻的生物量和组成受到浮萍生物量的影响, 其中, 腐烂状态浮萍湿重为 12 g/L 的处理组中附着硅藻最多, 在第 35 天其附着硅藻生物量达到了 249.13 mg/L。本实验各处理的氮、磷营养盐浓度均有一定的差异, 尤其浮萍生物量高的处理组 IV、V 中 DTN、DTP 浓度相对高(其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 SRP 反而没有添加浮萍的处理 I

最高), 表明浮萍生物量影响浮萍表面附着硅藻生物量的过程可能与氮、磷营养盐浓度有关。

附着硅藻优势种类与营养盐类型有一定关系。胡建成等^[31]利用着生硅藻评价赤水河生态状况, 发现氨氮为赤水河春秋时着生硅藻的主要影响因子。薛浩等^[32-33]对倭肯河和汤旺河着生硅藻的研究发现, 总氮、氨氮为影响硅藻群落的主要环境因子。Bellinger 等^[34]发现, 不同硅藻属的最适营养盐浓度有所不同, 极小异极藻和小舟形藻能够体现热带河流的富营养化水平。本实验中各处理组的浮萍上的附着硅藻

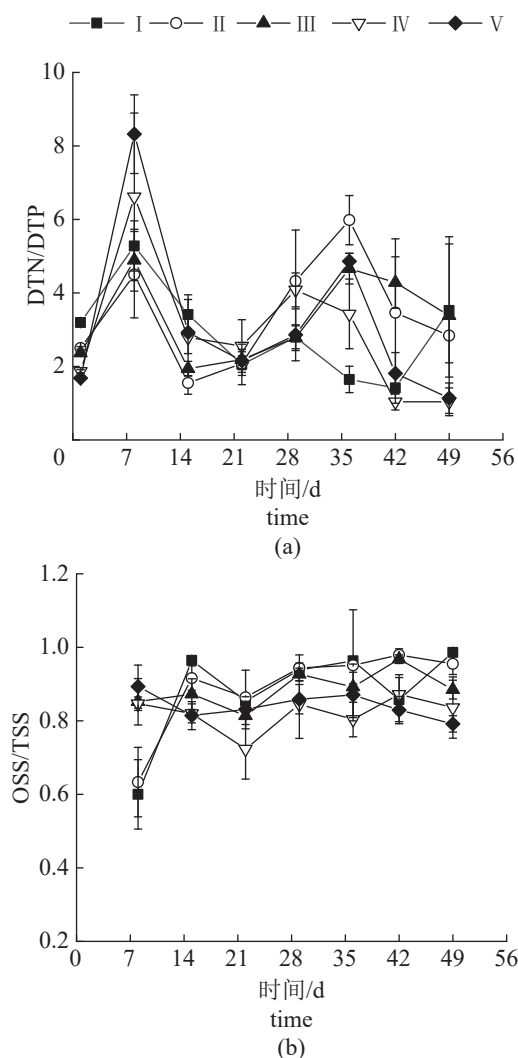


图3 各处理组 DTN/DTP (a) 及 OSS/TSS (b) 的变化

Fig. 3 The changes in DTN/DTP (a) and OSS/TSS (b) of each treatment

优势种类均为舟形藻属和卵形藻属, 其中舟形藻生物量占比最大, 均超过 50%, 表明本实验的富营养水平下更有利于舟形藻属和卵形藻属成为优势。

然而, 浮萍湿重为 14 g/L 的处理组 V 中, 附着硅藻的生物量低于处理组 IV, 即附着硅藻生物量没有随着浮萍湿重的增加一直增加, 表明除了营养盐, 还有其他因素影响附着硅藻的生长。光照也是影响附着硅藻生长的一个重要因素^[12]。与绿藻相比, 硅藻更能适应在弱光照条件下生长^[23]。但是在富营养条件下光照受影响, 导致光照成为各种藻类生长的限制因子^[35]。在一定范围内, 硅藻的生物量会随着光照强度的增强而升高, 当达到光饱和点时, 通过光合

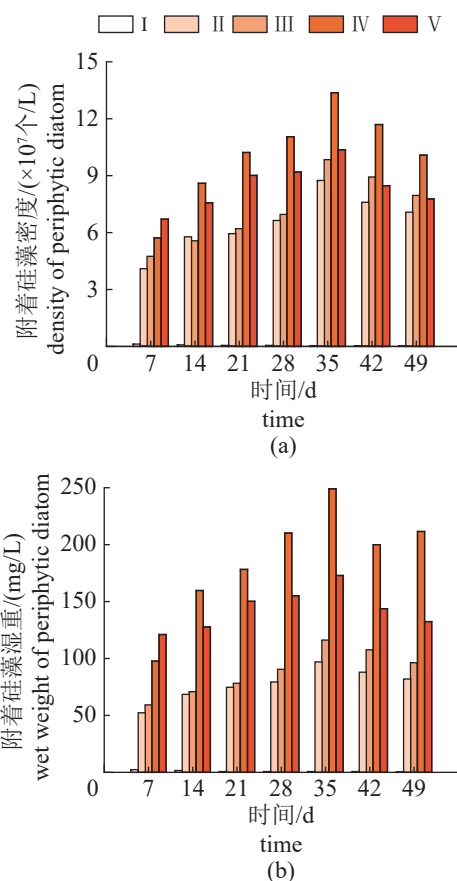


图4 各处理浮萍表面附着硅藻的变化

(a) 浮萍表面附着硅藻的密度, (b) 浮萍表面附着硅藻的湿重。

Fig. 4 Changes in density and wet weight of diatoms attached to *L. minor* under different treatments

(a) the density of diatoms attached to *L. minor*, (b) the wet weight of diatoms attached to *L. minor*.

作用所制造出有机物的量逐渐趋于稳定, 并达到峰值^[36]。本实验采用了曝气扰动, 促进浮萍在水中悬浮, 实验过程中各处理组的 TSS、OSS 浓度从高到低的排序均为 $V > IV > III > II > I$, 且 OSS/TSS 值一般在 0.7~0.9, 表明悬浮物的主要成分是有有机质, 即主要是藻类和浮萍, 这些藻类和浮萍会产生自遮光, 降低水中光照, 因此处理组 V 中没有出现更多的附着硅藻的原因可能与水中悬浮颗粒物产生的遮光过多而形成光限制有关。

附着硅藻的生长和种类组成除了受营养盐、光照的影响, 还受附着基质特性的影响, 如粗糙度、类型等也是影响硅藻附着生长的重要因素。附着基质的物理特征可能影响附着藻类的着生^[37]。有研究将玻璃片和水生植物篦齿眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 相比, 玻璃片上附

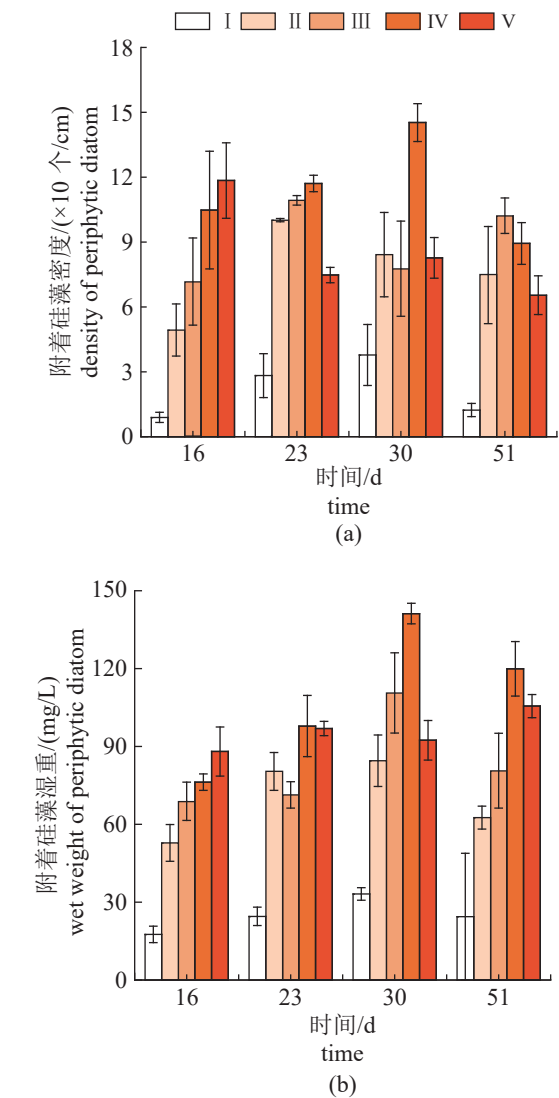


图5 各处理玻璃片上附着硅藻变化
(a) 玻璃片上附着硅藻的密度, (b) 玻璃片上附着硅藻的湿重。
Fig. 5 The changes in epiphytic diatoms attached to the glass sheet of each treatment
(a) the density of diatoms attached to the glass sheet, (b) the wet weight of diatoms attached to the glass sheet.

着藻类生物量明显少于篦齿眼子菜上的附着藻类^[12]。附着基质的粗糙度不同会对硅藻的附着生长产生不同影响。对添加了聚四氟乙烯超细粉末的氟碳树脂基涂层上的硅藻附着行为研究发现,随着聚四氟乙烯含量增加,涂层表面粗糙度下降,涂层上硅藻附着率成比例减小^[38]。兰波等^[39]认为,基质的粗糙度能显著提高附着藻类的生物多样性。Khatoon 等^[40]比较了竹管、塑料板、PVC 管、纤维素刷、瓷砖等 5 种基质上附着藻类的生长情况,发现不同基质上附着藻类的生物量存在差异。吴艳庆等^[24]研究了池塘网箱投放不同附着基对附着生物演替及刺参保苗效果的影响。念宇等^[41]在研究不同基质上附着藻类时发现,硅藻门始终是优势藻,尤其是舟形藻属在各基质上均为优势属。本实验中附着在玻璃片上的硅藻生物量显著低于附着在浮萍叶上的硅藻生物量,除了与浮萍腐烂过程中会释放营养盐供硅藻附着生长有关,可能还与浮萍叶较玻璃片更加粗糙,更有利于硅藻细胞的附着生长有关。

本实验中浮萍一方面可腐烂释放营养盐为硅藻吸收利用,同时也可以成为硅藻附着生长的基质,还与曝气扰动提供了水动力支持有关。由于浮萍是漂浮性水生植物,同时硅藻自身不具备浮力调控能力^[42],因此适当的扰动有助于浮萍悬浮在水中,为沉降性的硅藻附着生长和悬浮提供动力。本实验的曝气扰动还能促进营养盐充分混匀。曝气扰动也增加了水体 DO,形成了好氧条件,可以防止浮萍厌氧堆积。

4 结论

本实验提供了一种在曝气扰动下利用腐烂

表 1 处理组 II 中浮萍表面附着硅藻的湿重随时间变化

Tab. 1 Changes in the wet weight of epiphytic diatoms in treatment II								mg/L
附着硅藻 epiphytic diatom	第7天 day 7	第14天 day 14	第21天 day 21	第28天 day 28	第35天 day 35	第42天 day 42	第49天 day 49	
舟形藻属 <i>Navicula</i>	27.77	41.13	43.31	59.47	91.09	65.51	58.11	
卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	23.71	23.34	29.64	17.22	5.03	16.89	21.22	
平板藻属 <i>Tabellaria</i>	0.26	0.95	0.48	0.19	—	—	—	
小环藻属 <i>Cyclotella</i>	0.17	0.20	—	0.48	0.30	0.36	1.06	
曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	—	0.70	0.57	0.34	0.63	0.57	0.34	
异极藻属 <i>Gomphonema</i>	—	0.30	0.45	0.88	—	0.59	—	
短缝藻属 <i>Eunotia</i>	—	0.16	0.25	0.79	—	1.00	1.11	
桥湾藻属 <i>Cymbella</i>	0.30	0.76	0.48	—	—	—	—	
总计 total	52.21	68.52	74.82	79.04	97.04	87.90	81.86	

注: “—”表示对应样本中该属没有出现,下同。
Notes: “—” indicates that the genus does not appear in the corresponding samples, the same below.

表 2 处理组Ⅲ中浮萍表面附着硅藻的湿重随时间变化

Tab. 2 Changes in the wet weight of epiphytic diatoms in treatment Ⅲ							mg/L
附着硅藻 epiphytic diatom	第7天 day 7	第14天 day 14	第21天 day 21	第28天 day 28	第35天 day 35	第42天 day 42	第49天 day 49
舟形藻属 <i>Navicula</i>	35.82	38.22	42.00	45.02	77.13	78.62	70.90
卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	22.58	27.61	34.47	43.11	28.30	27.63	23.26
平板藻属 <i>Tabellaria</i>	—	0.92	0.32	—	2.08	—	—
菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	—	—	—	—	0.73	—	—
针杆藻属 <i>Synedra</i>	—	—	0.10	—	0.41	—	0.35
小环藻属 <i>Cyclotella</i>	0.53	0.47	0.65	0.44	0.87	0.31	—
曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	—	0.33	—	0.56	0.92	—	—
异极藻属 <i>Gomphonema</i>	—	1.93	—	1.29	—	—	0.42
短缝藻属 <i>Eunotia</i>	0.53	1.64	0.86	—	5.79	0.73	1.34
桥湾藻属 <i>Cymbella</i>	—	—	—	0.20	—	0.36	—
总计 total	59.46	71.12	78.40	90.62	116.23	107.65	96.27

表 3 处理组Ⅳ中浮萍表面附着硅藻的湿重随时间变化

Tab. 3 Changes in the wet weight of epiphytic diatoms in treatment Ⅳ							mg/L
附着硅藻 epiphytic diatom	第7天 day 7	第14天 day 14	第21天 day 21	第28天 day 28	第35天 day 35	第42天 day 42	第49天 day 49
舟形藻属 <i>Navicula</i>	62.30	88.42	112.02	136.86	170.54	155.06	106.47
卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	33.10	70.21	63.90	68.81	74.41	41.91	101.56
平板藻属 <i>Tabellaria</i>	0.59	—	1.48	1.01	1.43	1.3	1.91
菱形藻属 <i>Nitzschia</i>	0.65	—	—	2.90	2.10	0.95	1.26
针杆藻属 <i>Synedra</i>	0.49	—	—	—	—	—	—
小环藻属 <i>Cyclotella</i>	0.56	0.37	0.93	—	—	0.82	0.36
曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	—	0.65	—	0.54	0.64	—	—
总计 total	97.67	159.64	178.34	210.1	249.13	200.03	211.56

表 4 处理组Ⅴ中浮萍表面附着硅藻的湿重随时间的变化

Tab. 4 Changes in the wet weight of epiphytic diatoms in treatment Ⅴ							mg/L
附着硅藻 epiphytic diatom	第7天 day 7	第14天 day 14	第21天 day 21	第28天 day 28	第35天 day 35	第42天 day 42	第49天 day 49
舟形藻属 <i>Navicula</i>	60.66	77.58	103.68	123.96	143.91	113.99	104.33
卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	53.05	45.56	44.37	28.63	25.88	26.97	26.07
平板藻属 <i>Tabellaria</i>	3.73	—	—	1.77	1.19	—	1.21
针杆藻属 <i>Synedra</i>	—	—	0.37	—	0.22	—	—
小环藻属 <i>Cyclotella</i>	0.34	1.39	0.94	0.67	0.37	0.31	0.38
曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	2.13	2.30	0.83	—	—	1.11	0.50
异极藻属 <i>Gomphonema</i>	1.04	—	—	—	—	—	—
短缝藻属 <i>Eunotia</i>	—	0.92	—	—	1.32	1.48	—
总计 total	120.95	127.75	150.19	155.02	172.88	143.85	132.49

状态的浮萍培养附着硅藻的方法，通过调控腐烂状态浮萍的生物量，可以达到培养更多附着硅藻的目的。腐烂状态的浮萍释放出的氮、磷

等营养盐为硅藻生长提供物质基础，也是硅藻附着生长的介质。曝气扰动下腐烂浮萍上的附着硅藻生长受到腐烂浮萍的初始生物量影响，

当初始浮萍湿重为 12 g/L 时, 在第 35 天附着硅藻生物量达到最大, 为 249.13 mg/L。与玻璃片相比, 浮萍更有利于硅藻的附着生长。

参考文献 (References):

- [1] 邓洪平, 陈锋, 王明书, 等. 嘉陵江下游硅藻群落结构及物种多样性研究 [J]. *水生生物学报*, 2010, 34(2): 330-335.
Deng H P, Chen F, Wang M S, *et al.* Community structure and species diversity of diatom in downstream of Jialing River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(2): 330-335 (in Chinese).
- [2] Malviya S, Scalco E, Audic S, *et al.* Insights into global diatom distribution and diversity in the world's ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(11): E1516-E1525.
- [3] Ambler J W, Frost B W. The feeding behavior of a predatory planktonic copepod, *Tortanus discaudatus*[J]. *Limnology and Oceanography*, 1974, 19(3): 446-451.
- [4] 徐力文, 刘广锋, 王江勇. 鲍育苗生物学中饵料硅藻的相关研究进展 [J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(4): 611-618.
Xu L W, Liu G F, Wang J Y. Advances in study on food diatoms for breeding abalone larvae[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(4): 611-618 (in Chinese).
- [5] 由文辉. 淀山湖着生藻类群落结构与数量特征 [J]. *环境科学*, 1999, 20(5): 59-62.
You W H. The species composition and quantitative features of the periphytic algae communities in Dianshan Lake[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(5): 59-62 (in Chinese).
- [6] Ács É, Kiss K T. Investigation of periphy algae in the Danube at Göd (1669 river km, Hungary)[J]. *Algological Studies*, 1991, 62(8): 47-67.
- [7] 苏胜齐, 沈益绿, 姚维志. 菹草着生藻类的群落结构与数量特征初步研究 [J]. *西南农业大学学报*, 2002, 24(3): 255-258.
Su S Q, Shen A L, Yao W Z. Species composition and quantitative features of periphytic algae communities on *Potamogeton crispus* L.[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 2002, 24(3): 255-258 (in Chinese).
- [8] 顾久君, 金朝晖, 刘振英. 乌梁素海沉水植物腐烂分解试验研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(4): 181-184.
- [9] 黄邦钦, 程兆第, 金德祥. 厦门港试验挂板上附着硅藻研究 [J]. *厦门大学学报自然科学版*, 1989, 28(5): 549-553.
Huang B Q, Cheng Z D, Jin D X. Ecological study of attached diatoms on artificial substrata in Xiamen Harbour, China[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*, 1989, 28(5): 549-553 (in Chinese).
- [10] 陈向, 刘静, 何琦, 等. 东江惠州河流段人工基质附着硅藻群落季节性动态 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(5): 723-731.
Chen X, Liu J, He Q, *et al.* Seasonal variations of periphytic diatom community in artificial substrata in Huizhou section of the Dongjiang River, Guangdong Province, Southern China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(5): 723-731 (in Chinese).
- [11] Brown M R, Jeffrey S W. The amino acid and gross composition of marine diatoms potentially useful for mariculture[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1995, 7(6): 521-527.
- [12] van Dijk G M. Dynamics and attenuation characteristics of periphyton upon artificial substratum under various light conditions and some additional observations on periphyton upon *Potamogeton pectinatus* L.[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 252(2): 143-161.
- [13] Wang X D, Liu X G, Qin B Q, *et al.* The biomass of bloom-forming colonial *Microcystis* affects its response to aeration disturbance[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 20985.
- [14] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 38-47, 107-108.
The State Environmental Protection Administration, The Water and Wastewater Monitoring Analysis Method Editorial Board. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 38-47, 107-108 (in Chinese).
- [15] Gross A, Boyd C E. A digestion procedure for the simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in pond water[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1998, 29(3): 300-303.

- [16] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 23-903.
- Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006: 23-903 (in Chinese).
- [17] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 252-288.
- Zhang Z S, Huang X F. Research methods of freshwater plankton[M]. Beijing: Science Press, 1991: 252-288 (in Chinese).
- [18] Smith S M, Lee K D. Responses of periphyton to artificial nutrient enrichment in freshwater kettle ponds of Cape Cod National Seashore[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 571(1): 201-211.
- [19] Kilroy C, Suren A M, Wech J A, *et al.* Epiphytic diatoms as indicators of ecological condition in New Zealand's lowland wetlands[J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2017, 51(4): 505-527.
- [20] Rodusky A J, Anderson Jr R T. A comparison of epiphytic communities on natural and artificial substrates in a large subtropical lake (Lake Okeechobee, USA)[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2013, 183(3): 189-204.
- [21] Hao B B, Wu H P, Zhen W, *et al.* Warming effects on periphyton community and abundance in different seasons are influenced by nutrient state and plant type: a shallow lake mesocosm study[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 404.
- [22] Hao B B, Wu H P, Cao Y, *et al.* Comparison of periphyton communities on natural and artificial macrophytes with contrasting morphological structures[J]. *Freshwater Biology*, 2017, 62(10): 1783-1793.
- [23] Sánchez M L, Pérez G L, Izaguirre I, *et al.* Influence of underwater light climate on periphyton and phytoplankton communities in shallow lakes from the Pampa plain (Argentina) with contrasting steady states[J]. *Journal of Limnology*, 2013, 72(1): 62-78.
- [24] 吴艳庆, 赵奎峰, 刘立明, 等. 池塘网箱投放不同附着基对附着生物演替及刺参保苗效果的影响 [J]. *海洋科学*, 2016, 40(4): 22-31.
- Wu Y Q, Zhao K F, Liu L M, *et al.* Effects of substrate type on succession of periphyton and intermediate seedling culture of sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka, in net cages set in an earthen pond[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(4): 22-31 (in Chinese).
- [25] Havens K E, East T L, Rodusky A J, *et al.* Littoral periphyton responses to nitrogen and phosphorus: an experimental study in a subtropical lake[J]. *Aquatic Botany*, 1999, 63(3-4): 267-290.
- [26] Gaiser E. Periphyton as an indicator of restoration in the Florida Everglades[J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(S6): S37-S45.
- [27] Özkan K, Jeppesen E, Johansson L S, *et al.* The response of periphyton and submerged macrophytes to nitrogen and phosphorus loading in shallow warm lakes: a mesocosm experiment[J]. *Freshwater Biology*, 2010, 55(2): 463-475.
- [28] Zhang X F, Mei X Y. Periphyton response to nitrogen and phosphorus enrichment in a eutrophic shallow aquatic ecosystem[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(1): 59-64.
- [29] Howard-Williams C, Davies B R, Cross R H M. The influence of periphyton on the surface structure of a *Potamogeton pectinatus* L. leaf (an hypothesis)[J]. *Aquatic Botany*, 1978, 5: 87-91.
- [30] 董旭辉, 羊向东, 潘红玺. 长江中下游地区湖泊现代沉积硅藻分布基本特征 [J]. *湖泊科学*, 2004, 16(4): 298-304.
- Dong X H, Yang X D, Pan H X. Distribution of modern lake sediment diatoms in the middle and lower reaches of Yangtze River catchment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 298-304 (in Chinese).
- [31] 胡建成, 郭姝含, 唐涛, 等. 基于着生硅藻多参数指标评价赤水河生态状况 [J]. *中国环境监测*, 2020, 36(3): 94-104.
- Hu J C, Guo S H, Tang T, *et al.* Using benthic diatom-based multi-metric indices to assess ecological conditions of the Chishui River[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(3): 94-104 (in Chinese).
- [32] 薛浩, 姚志鹏, 孟凡生, 等. 倭肯河着生硅藻群落结构及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(12): 4096-4105.
- Xue H, Yao Z P, Meng F S, *et al.* Community structures of periphyton and their relationship with aquatic environmental factors in the Woken River, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(12): 4096-4105 (in Chinese).
- [33] 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 等. 汤旺河着生硅藻群落及其与环境因子的关系 [J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1256-1264.

- Xue H, Wang Y Y, Meng F S, *et al.* Community of benthic diatoms and their relationship with aquatic environmental factors in the Tangwang River, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1256-1264 (in Chinese).
- [34] Bellinger B J, Cocquyt C, O'Reilly C M. Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 573(1): 75-87.
- [35] Huisman J, Sharples J, Stroom J M, *et al.* Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species[J]. *Ecology*, 2004, 85(11): 2960-2970.
- [36] 陈诗越, 刘双爽, 杨丽伟, 等. 东平湖硅藻群落结构特征及其与水环境的关系 [J]. *江苏师范大学学报 (自然科学版)*, 2014, 32(2): 1-7.
- Chen S Y, Liu S S, Yang L W, *et al.* Structure characteristics of sediment diatom communities and their relationships with water environment in Dongping Lake, Northern China[J]. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 32(2): 1-7 (in Chinese).
- [37] Otten J H, Willemse M T M. First steps to periphyton[J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1988, 112(2): 177-195.
- [38] 张占平, 刘红, 齐育红, 等. 含 PTFE 氟碳涂层表面形貌对底栖硅藻附着的影响 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2006, 22(6): 122-125.
- Zhang Z P, Liu H, Qi Y H, *et al.* Influence of morphology of fluorocarbon coatings with PTFE on the settlement of benthic diatom[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2006, 22(6): 122-125 (in Chinese).
- [39] 兰波, 向贤芬, 贾延亭, 等. 洱海流域沿岸带石质基质上周丛藻类群落研究 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(11): 1881-1887.
- Lan B, Xiang X F, Jia Y T, *et al.* Investigation of epilithic periphyton communities of the littoral zone of the lakes in Erhai watershed[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(11): 1881-1887 (in Chinese).
- [40] Khatoon H, Yusoff F M, Banerjee S, *et al.* Use of epiphytic cyanobacterium and mixed diatoms coated substrate for improving water quality, survival and growth of *Penaeus monodon* Fabricius postlarvae[J]. *Aquaculture*, 2007, 271(1-4): 196-205.
- [41] 念宇, 韩耀宗, 杨再福. 不同基质上着生生物群落生态学特性比较研究 [J]. *环境科技*, 2009, 22(5): 14-17.
- Nian Y, Han Y Z, Yang Z F. Ecological characteristics of periphyton communities on different kinds of substrates and comparison[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 22(5): 14-17 (in Chinese).
- [42] Kiørboe T. Turbulence, phytoplankton cell size, and the structure of pelagic food webs[J]. *Advances in Marine Biology*, 1993, 29: 1-72.

Effects of duckweed (*Lemna minor*) biomass on epiphytic diatom colonization under aeration disturbance

PAN Hengfeng ^{1,2}, WANG Xiaodong ^{1*}, CHE Xuan ¹, WANG Hong ^{1,2},
LI Yiming ³, CHENG Xiangyu ^{1,2}, LIU Xingguo ¹

1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Inland Saline-alkaline Aquaculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Engineering Technology Research Center of Saline-alkaline Water Fisheries, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: Diatoms (Bacillariophyta) have important biological significance and application value. Diatoms are important primary producers in water bodies and can serve as bait for many fish, shellfish, and other aquatic animals, thus playing a crucial role in aquatic ecosystems, particularly in aquaculture. The high-density cultivation of diatoms, particularly epiphytic species, represents a critical research frontier in aquaculture. However, there is currently limited research on using natural aquatic plants to cultivate epiphytic diatoms. In order to cultivate epiphytic diatoms with *Lemna minor*, a culture experiment was conducted with decaying *L. minor* in different biomass under aeration disturbance. According to the wet biomass gradient of the rotting *L. minor*, a total of 5 treatments were set as 0, 4, 8, 12 and 14 g/L, named as treatment I, II, III, IV and V from low to high, respectively, each with 3 replicates. The results showed that no hypoxia occurred in any of the treatments. The concentrations of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and soluble reactive phosphorus (SRP) in treatment I [(0.584±0.649) and (0.336±0.274) mg/L, respectively] were significantly higher than those in the other treatments ($P<0.05$). The dissolved total nitrogen (DTN) and dissolved total phosphorus (DTP) concentrations in all treatments exhibited a declining trend before stabilizing, with no significant differences observed between treatments. Although treatment V had the highest mean DTN [(1.665±1.678) mg/L] and DTP [(0.603±0.672) mg/L] concentrations, these values were not statistically significant. In the middle and late stages of the experiment, diatoms of *Navicula* and *Cocconeis* appeared on the rotting *L. minor*, and the wet weight of the epiphytic diatoms of treatment IV was the highest ($P<0.05$), reaching the maximum of 249.13 mg/L on the 35th day. The maximum biomass of epiphytic diatoms on *L. minor* was significantly higher than that on glass sheetS ($P<0.05$). The results show that the wet biomass of rotting *L. minor* at 12 g/L is more conducive to the growth of epiphytic diatoms under aeration disturbance, and *L. minor* are more beneficial to the growth of epiphytic diatoms than glass sheet. The rotting *L. minor* releases nutrients such as nitrogen and phosphorus, providing a material basis for the growth of diatoms and serving as a medium for the diatoms' attachment growth. This experiment provides a feasible method for cultivating epiphytic diatoms in a decaying state of *L. minor* under aeration disturbance, expanding the cultivation method of epiphytic diatoms.

Key words: *Lemna minor*; epiphytic diatoms; aeration disturbance; nutrients

Corresponding author: WANG Xiaodong. E-mail: wangxiaodong@fmiri.ac.cn

Funding projects: National Freshwater Genetic Resource Center (FGRC: 18537); National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900305); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD67)