

新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)制备参数 对藻球性质及去氮磷效果的影响

黄 晨, 蒋霞敏*, 韩庆喜, 彭瑞冰, 周爽男

(宁波大学 海洋学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 为了制备出高效的固定化藻球, 完善固定化藻球的制备工艺, 以新月菱形藻为藻种, 采用褐藻胶包埋技术和单因子试验, 研究了不同褐藻酸钠质量分数(2.0%、2.5%、3.0%)和不同溶剂(海水、蒸馏水、NaCl 溶液)对藻球形状、强度、传质性、去除氮磷效果及藻细胞生长的影响。结果表明: 不同褐藻酸钠质量分数对藻球形状影响显著($P<0.05$), 褐藻酸钠质量分数为 2.0%和 2.5%时藻球呈球形, 为 3.0%时藻球呈不规则的水滴形; 不同溶剂种类对藻球形状则无影响。不同褐藻酸钠质量分数对藻球强度影响显著($P<0.05$), 随着褐藻酸钠浓度的增加, 藻球强度逐渐增强; 不同溶剂对藻球强度的影响显著($P<0.05$), 影响大小的排序为海水>NaCl>蒸馏水。不同褐藻酸钠质量分数和不同溶剂对藻球传质性影响显著($P<0.05$), 随着褐藻酸钠浓度的增加, 藻球传质性也逐渐增强; 溶剂对传质性影响的强弱排序为海水>NaCl>蒸馏水; 不同褐藻酸钠质量分数和不同溶剂对固定化藻球藻细胞生长及去氮磷效率影响显著($P<0.05$), 其中以 3.0%褐藻酸钠+海水的藻细胞生长最快, 去除氮磷效率最佳。

关键词: 褐藻酸钠浓度; 溶剂种类; 固定化新月菱形藻; 藻球性状; 生长速率; 氮磷去除效率

中图分类号: S917.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 01-0032-06

固定微藻的方法主要有 3 种: 包埋法、交联法和载体结合法^[1], 目前研究最多的是包埋法。微藻固定化包埋技术是指将游离的微藻细胞通过固定和包埋等方法将游离的微藻细胞固定在载体上的方法^[2], 其原理是让藻细胞扩散, 进入到多孔性载体的内部, 或利用高聚物等在形成凝胶时将藻细胞包埋在内部^[3]。包埋法的优点是在固定化过程中藻细胞活性丧失少, 固定化藻球的强度高、传质性能较好、性质较稳定等^[4-6]。固定化技术使藻细胞不仅有温和的环境, 且不易受外界的影响, 藻群较易控制, 能反复的使用, 在一定程度上可提高利用率; 同时具有较高的藻细胞浓度, 反应速度快。另外, 藻类的固定化有利于固液分离, 便于藻的收获和综合利用^[7-8]。目前国内外研究较多的是淡水固定化微藻, 有关海水固定化微藻鲜有报道^[9-10]。

新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)隶属硅藻门、羽纹硅藻纲、管壳缝目、菱形藻科、菱形藻属, 是常用的单细胞饵料种, 具有生长繁殖快、易培养等优点。本文以新月菱形藻为藻种, 褐藻酸钠为固定化载体, 分别以蒸馏水、海水和 NaCl 溶液为溶剂, 探究不同浓度褐藻酸钠和不同溶剂对藻球形状、藻球强度、藻球传质性、藻细胞生长及其去除氮磷的影响, 旨在为微藻固定化培养与养殖污水的治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用的新月菱形藻来自宁波大学海洋学院藻种室。培养液配方采用宁波大学 3[#]培养液(表 1)。培养用水采用象山港天然海水, 经沙滤、暗沉

收稿日期: 2019-08-11.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省公益项目 (2015C3204) ; 宁波市科技项目 (2015C10062) ; 温州市科技计划项目 (2018ZS002) .

第一作者: 黄晨 (1996-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 微藻定向培养. E-mail: 2074207292@qq.com

*通信作者: 蒋霞敏 (1957-), 女, 浙江舟山人, 博导/教授, 主要研究方向: 水产养殖与饵料生物培养. E-mail: jiangxiamin@nbu.edu.cn

淀、脱脂棉过滤和烧开冷却。将藻种置于 GXZ 智能型光照培养箱(宁波江南仪器厂)培养, 培养条件: 温度(25±1)℃, 盐度 25, 光照强度 4 500 lx, pH 7.86, 光暗周期 L:D (12 h:12 h), 不充气。实验采用人工模拟污水, 即在缺氮的 3[#]母液中加入一定量的 NH₄Cl (NH₄⁺-N 质量浓度为 17 mg·L⁻¹)。

表 1 宁波大学 3[#]培养液配方

药品名称	含量/(mg·L ⁻¹)	药品名称	含量/(mg·L ⁻¹)
KNO ₃	100	EDTA-Na ₂	10
KH ₂ PO ₄	10	VB ₁	6×10 ⁻³
FeSO ₄ ·7H ₂ O	2.5	VB ₁₂	5×10 ⁻⁵
MnSO ₄ ·H ₂ O	0.25		

脱固定化方法: 在测定固定化藻细胞密度时先脱固定化, 即将固定化藻球放入盛有一定量 3.0% 柠檬酸三钠(Na₃C₆H₅O₇)化解液中, 摇动, 直至固定化藻球完全溶解成悬浮状, 再测定藻细胞密度。

1.2 实验设计

1.2.1 固定化藻球制作方法

藻的固定化采用褐藻酸钠包埋, 即将处于对数生长期的蛋白核新月菱形藻液置于立式高速离心机(ELITIST 15K), 以 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 弃上清液, 用少许消毒海水溶解备用。采用不同溶剂(海水、蒸馏水、NaCl 溶液)和不同质量分数(4.0%、5.0%和 6.0%)的褐藻酸钠, 搅拌制成均一的凝胶, 在干热灭菌锅(YX-280B)中 120℃高压灭菌 1 h, 冷却至室温((25±3)℃)。将褐藻酸钠与浓缩藻液按体积 (1:1)混合, 搅拌制成均一的褐藻酸钠藻胶。用制粒机在距离 3.0%CaCl₂ 溶液液面 5 cm 处, 制成直径约 3 mm 的藻球, 固定 2 h, 用不同褐藻酸钠质量分数(2.0%、2.5%、3.0%)和不同溶剂(海水、蒸馏水、NaCl 溶液)制备藻球。

1.2.2 不同藻球的形状、强度及传质性试验

将制成的 9 种不同的固定化藻球, 分别用显微镜、质构仪(TMS-PRO)和分光光度计(UV2800AH)进行分析。

1.2.3 不同藻球对藻生长及去氮磷效果试验

将制成的 9 种固定化藻球用 250 mL 三角烧瓶培养, 加入人工模拟废水 200 mL, 加藻球 5 g, 每组设 3 个平行, 并设不加藻球的空白组。培养条件同 1.1 节, 培养时间 9 d, 隔天测定水体中 NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 浓度。始末用血球计数板法对藻细胞计数。

1.3 测定指标

藻球形状测定: 采用显微镜法, 用镊子取出制备的试验藻球, 置于吸水纸上, 除去多余的水分, 用美工刀将藻球对切成两半, 横切面向上置于载玻片上, 盖上盖玻片, 在 40 倍显微镜下观察, 并拍照记录。

藻球强度测定: 采用质构仪的测试方法, 每组样品用镊子取出 5~10 颗藻球, 置于吸水纸上, 除去水分; 再夹取 1 颗藻球置于测试台面中心, 启动测定按钮, 读取数据。每个样品测试 3 次。

藻球传质性测定: 将分光光度计的波长调至 600 nm, 取 0.2 mL 的蓝墨水加入比色皿中, 再加入 50 mL 纯水进行稀释并摇匀。分别取不同藻球(9 种)各 4 g, 浸泡时间 3 min, 从各比色皿中依次吸取 5 mL 墨水, 加入 20 mL 纯水稀释, 用未放胶球的对照组依次润洗比色皿 2 次, 测量并记录数据。

生长速率测定: 始末取 20 mL 3.0 % 的 Na₃C₆H₅O₇ 溶液加入离心管中, 再在各试验组中取 1 g 藻球加入离心管, 溶解 2~3 h, 搅拌, 用血球计数板法计数, 藻细胞生长速率 K 的计算公式为:

$$K=(\ln N_1 - \ln N_0)/(t_1 - t_0),$$

式中: t_0 为培养开始时间; t_1 为培养结束时间; N_0 、 N_1 分别为 t_0 、 t_1 时期的藻细胞密度。

NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 测定: 用纳氏试剂分光光度法测 NH₄⁺-N, 用磷钼蓝分光光度法测 PO₄³⁻-P^[7]。氮磷去除率 P 的计算公式为:

$$P=(C_0 - C_1)/C_0,$$

式中: C_0 为初始氮磷浓度; C_1 为第 N 天的氮磷浓度。

1.4 数据处理

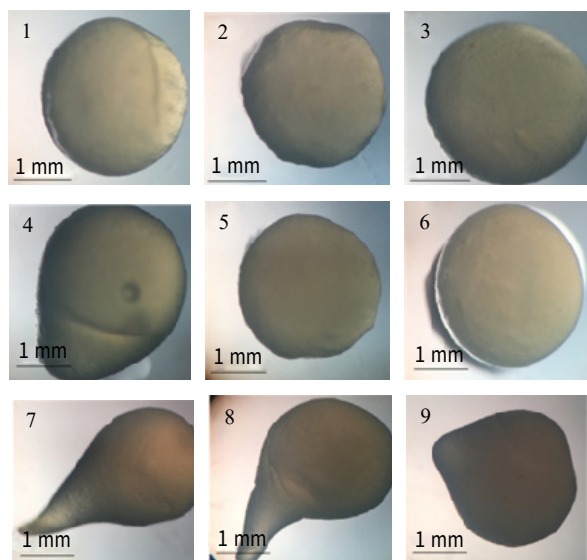
采用 Excel 2016 进行处理数据, 并用 SPSS 23.0 软件对试验数据进行 Duncan 和单因素的方差分析, 以及多重比较分析, 以 $P<0.05$ 作为差异显著性判断标准。

2 结果与分析

2.1 不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球形状的影响

不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球形状的影响显著。当褐藻酸钠质量分数为 2.0%时, 3 种溶剂制成的藻球均呈球形; 当褐藻酸钠质量分数为 2.5%时, 海水和 2.0%NaCl 制成的藻球呈球形,

蒸馏水制成的藻球呈亚梨形;而当褐藻酸钠质量分数为3.0%时,3种溶剂制成的藻球均呈不规则的水滴形(图1)。



1 为 2.0%褐藻酸钠+蒸馏水;2 为 2.0%褐藻酸钠+海水;3 为 2.0%褐藻酸钠+NaCl;4 为 2.5%褐藻酸钠+蒸馏水;5 为 2.5%褐藻酸钠+海水;6 为 2.5%褐藻酸钠+NaCl;7 为 3.0%褐藻酸钠+蒸馏水;8 为 3.0%褐藻酸钠+海水;9 为 3.0%褐藻酸钠+NaCl。下同。

图1 不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球形状的影响

2.2 不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球强度的影响

不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球强度的影响如图2所示。

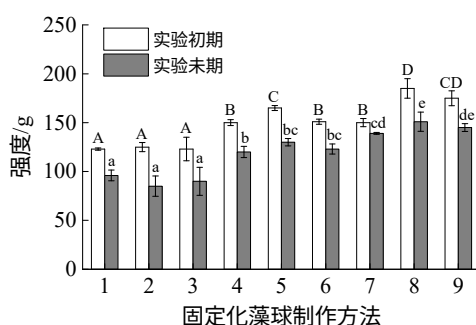


图2 固定化藻球制作方法对藻球强度的影响

从图2可知,实验末期的藻球强度均小于实验初期的强度($P<0.05$);实验证明不同褐藻酸钠浓度对藻球强度的影响显著($P<0.05$),固定化强度随着褐藻酸钠浓度的增大而增强,藻球强度大小排序为3.0%褐藻酸钠>2.5%褐藻酸钠>2.0%褐藻酸钠;不同溶剂对藻球强度的影响显著($P<0.05$),藻球强度按大小排序为海水>NaCl>蒸馏水。在实验组中

强度最大的是3.0%褐藻酸钠+海水组,在实验初期和末期强度分别为185 g和151 g。

2.3 不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球传质性的影响

不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球传质性影响显著(图3)。在前3 min,吸光度的降速远大于后6 min;不同褐藻酸钠浓度对藻球传质性也有显著影响($P<0.05$),其中传质性最好的是3.0%褐藻酸钠浓度组,平均为31.33%;2.0%和2.5%褐藻酸钠组传质性较差,两者不存在显著性差异($P>0.05$)。不同的溶剂对藻球传质性影响显著($P<0.05$),其中传质性最好的是海水组,平均为35.33%;传质性较差的为蒸馏水和NaCl组,两者不存在显著性差异($P>0.05$);实验中传质性较好的是3.0%褐藻酸钠+海水组和3.0%褐藻酸钠+蒸馏水组,吸光度分别为30%和31%,与其他组存在显著性差异($P<0.05$);传质性最差的是2.5%海藻酸钠+NaCl组,吸光度为44%,与其他组存在显著性差异($P<0.05$)。从传质性角度分析,效果好的组可在单位时间内吸收更多的营养素和较少的水分。

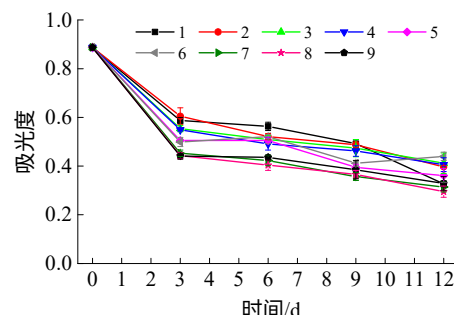


图3 固定化藻球制作方法对藻球传质性的影响

2.4 不同浓度的褐藻酸钠与不同溶剂对藻球生长的影响

不同褐藻酸钠浓度和不同溶剂对藻球生长的影响如图4所示。实验组K值在0.263 5~0.445 7之间;不同的褐藻酸钠浓度对藻球生长影响显著($P<0.05$),2.0%、2.5%和3.0%褐藻酸钠组的K值分别为0.306 6、0.333 3和0.364 5。不同溶剂对藻球生长影响显著($P<0.05$),其中生长最好的是海水组,K值为0.346 7;蒸馏水和NaCl组,K值分别为0.325 4和0.321 6,两者不存在显著性差异($P>0.05$)。在实验组中生长最好的是3.0%褐藻酸钠+海水组,K值为0.445 7,与其他组存在显著性差异($P<0.05$);

传质性最差的是 2.0%海藻酸钠+海水组, K 值为 0.263 5, 与其他组存在显著性差异($P<0.05$). 从生长角度分析, 效果好的组可在单位时间内获得更高的生长速度.

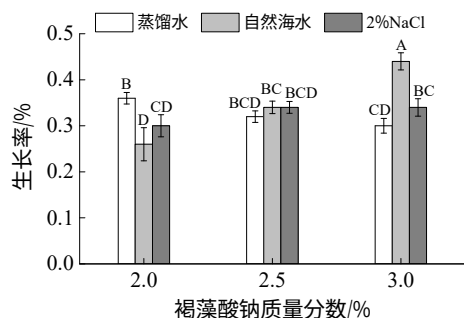


图4 固定化藻球制作方法对藻的生长速度的影响

2.5 不同的褐藻酸钠浓度和不同溶剂对藻球氮磷去除的影响

不同的褐藻酸钠浓度和不同溶剂对藻球去氮磷的影响如图5和图6所示. 实验组9d中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 67.82%~90.61%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率为 49.02%~96.68%. 不同褐藻酸钠浓度对藻球 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除影响显著($P<0.05$), 2.0%、2.5%和 3.0%褐藻酸钠组对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 78.42%、81.71%和 88.76%. 不同溶剂对藻球 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率影响显著($P<0.05$), 其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率最好的是海水组, 去除率为 89.82%; 蒸馏水和 NaCl 组较差, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率分别为 80.92%和 78.16%, 且两者不存在显著性差异($P>0.05$); 实验组中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率最好的是 3.0%褐藻酸钠+海水组, 去除率为 90.61%, 与其他组存在显著性差异($P<0.05$); 最差的是 2.0%褐藻酸钠+NaCl 组, 去除率为 67.82%, 与其他组存在显著性差异($P<0.05$). 不同溶剂对藻球 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除影响显著($P<0.05$), 其中蒸馏水组、海水组和 NaCl 组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率分别为 77.59%、88.57%和 69.23%, 最佳的溶剂为海水; 不同褐藻酸钠浓度对藻球 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率影响显著($P<0.05$), 其中去除效果最好的是 3.0%褐藻酸钠组, 去除率为 84.85%; 最差的为 2.0%褐藻酸钠组, 去除率为 68.83%. 在实验组中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率最好的是 3.0%褐藻酸钠+海水组, 去除率为 96.68%, 与其他组存在显著性差异($P<0.05$); $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率最差的是 2.0%褐藻酸钠+NaCl 组, 去除率为 49.02%, 与其他组存在显著性差异($P<0.05$).

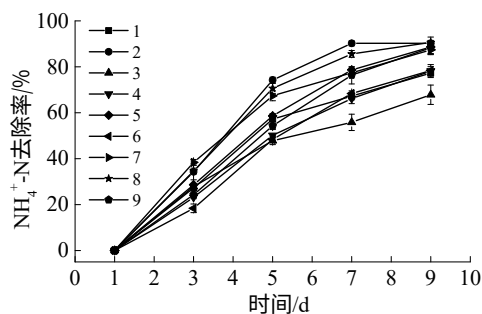


图5 固定化藻球制作方法对藻球去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响

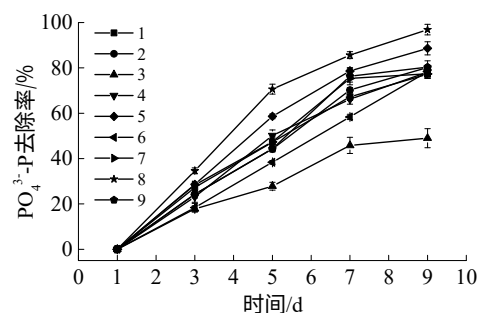


图6 固定化藻球制作方法对藻球去除 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的影响

3 讨论

3.1 不同的固定化藻球制作方法对藻球外部的影响

固定化藻球需具有较高的粒度、强度和孔隙度等, 否则藻细胞容易脱落, 同时载体必须利于物质交换, 便于藻对营养盐和 CO_2 的吸收^[11-12]. Eroglu 等^[13]研究了不同来源的褐藻酸钠盐作为细胞固定化基质的性质, 发现褐藻酸盐的黏度与其分子量成正比, 褐藻酸钠浓度影响胶球的机械强度, 当浓度大于一定值时, 主要受浓度影响. 在本研究所制成的不同浓度褐藻酸钠藻球, 不仅导致制成的藻球的黏度有差别, 而且导致藻球形状差别很大, 2.0%褐藻酸钠都为规则的球形, 而 3.0%褐藻酸钠则为水滴形. 这是由于在成球过程中, 褐藻酸钠中 Na^+ 与固定液 Ca^{2+} 置换造成. 海水和 2.0%NaCl 中含有游离 Na^+ 离子, 会增大成球的黏性.

3.2 不同固定化藻球制作方法对藻球内部的影响

随着褐藻酸钠浓度的增加, 其与 CaCl_2 溶液所形成的凝胶网络逐渐致密, 凝胶珠的机械强度增高, 藻细胞能够很好地包埋于其中, 并通过凝胶网络的孔隙获得培养液中的营养, 排除代谢物^[14-15]. 这与本实验结果(最高的褐藻酸钠组(浓度为 3.0%)具有最高的强度、最好的传质性、最大的生长速率和最高的氮磷去除率)相符. 在实验进行到第 9 天

时 2.0%褐藻酸钠组有部分藻球出现水解破碎,这是由于形成的凝胶网络不够坚固,在交换营养物质和代谢物时易被水流冲碎,而 2.5%和 3.0%的褐藻酸钠组均未出现上述情况,这与杨海波等^[16]选用 2.0%褐藻酸钠研究结果不一致,其原因有待进一步研究.在 3 种溶剂的比较中,海水的效果最好,因为相较于蒸馏水,海水中含有大量的 Na^+ 离子,在与 CaCl_2 溶液交联过程中提高了凝胶中 Na^+ 离子的浓度,从而提高了交联效果^[17];同时,相较于 NaCl 溶液,海水中含有少量的 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Sr^{2+} 等离子,可能会对凝胶网络有加固作用,这与 Wahid 等^[18]在用多层石墨烯和氧化石墨烯板片固定化新月菱形藻的研究结果相一致.

3.3 不同固定化藻球制作方法对藻球生长的影响

本实验采用包埋法对新月菱形藻进行固定化处理,各组都有很高的生长率,与邢丽珍等^[11-12]研究结果相一致.3.0%褐藻酸钠组虽具有较高的生长率,但在实验结束 1 个月后发现其最先发黄衰败,这和杨海波等^[16]的研究结果相一致.因此,固定化藻球的长时间使用有待进一步研究.

3.4 不同固定化藻球制作方法对藻球氮磷去除的影响

微藻对水体氮的去除,主要是通过吸收无机和有机氮化合物作为氮源来合成氨基酸,其中对无机氮的利用以 NH_4^+-N 为主,这是由于藻类缺乏活性硝酸还原酶,因此微藻对硝氮 NO_3^--N 的吸收利用.仅发生于 NH_4^+-N 浓度很低或耗尽时^[19].藻类对污染水体中磷的去除,包括藻类对磷的吸收以及对含磷化合物的表面吸附沉积,其中主要是利用活性磷酸盐来维持藻类的生长^[20-21].此外,藻类生长繁殖会导致水体 pH 值的增加,会将氨氮转变为氨气释放,也会使溶解性磷酸盐与水中的钙离子形成羟基化磷酸钙物质沉淀,最后被藻类所吸附^[22].在本实验中,由于 3.0%褐藻酸钠组具有更高的生长率,因此具有最高的氮磷去除率,这与文献[23-25]的研究结果相一致,但与文献[26]的研究结果相悖,其原因可能与不同微藻种类以及不同藻球的制备环境有关.

参考文献:

[1] 辛荣,李慷均.微藻的固定化及在水产养殖中的应用

[J].齐鲁渔业,2010,27(3):52-53.

- [2] 周卫征,霍书豪,朱顺妮,等.微藻固定化技术及其在资源化中应用[J].可再生能源,2011,29(4):90-94.
- [3] 孙红文,黄国兰,丛丽莉.藻类固定化技术在环境领域中的应用[J].上海环境科学,1999,18(8):356-359.
- [4] Spolaore P, Joannis C, Duran E, et al. Commercial applications of microalgae[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(2):87-96.
- [5] 马志珍,张继红.海产底栖硅藻的固定化培养研究[J].中国水产科学,1996,3(2):13-19.
- [6] Morelno G. Microalgae immobilization: Current techniques and uses[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(10):3949-3964.
- [7] 张向阳,邢丽贞,张彦浩,等.固定化小球藻去除污水中氮、磷的试验研究[J].中国给水排水,2008,24(1):95-97; 101.
- [8] 黄翔鹄,李长玲,郑莲,等.固定化微藻对虾池弧菌数量动态的影响[J].水生生物学报,2005,29(6):684-688.
- [9] 韩仕群,张振华,严少华.国内外利用藻类技术处理废水、净化水体研究现状[J].农业环境与发展,2000,17(1):13-16.
- [10] 崔华平,林炜铁.固定化微生物在水产养殖中的应用[J].水产科学,2008,27(4):213-216.
- [11] 邢丽贞,李飞,张向阳,等.固定化微藻在解决环境问题方面的应用[J].水资源保护,2006,22(5):9-12; 59.
- [12] 邢丽贞,张向阳,张波,等.藻菌固定化去除污水中氮磷营养物质的初步研究[J].环境科学与技术,2006,29(1):33-34; 74.
- [13] Eroglu E, Agarwal V, Bradshaw M, et al. Nitrate removal from liquid effluents using microalgae immobilized on chitosan nanofiber mats[J]. Green Chemistry, 2012, 14(10):2682-2685.
- [14] 吴秋惠,吴皓,王令充,等.海藻酸钠微球的制备及其在药物载体中的应用进展[J].中华中医药杂志,2011,26(8):1791-1794.
- [15] 王逸云,王长海.无菌条件下的小球藻培养条件优化[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2006,19(2):125-129.
- [16] 杨海波,于媛,张欣华,等.小球藻固定化培养的初步研究[J].水产科学,2001,20(5):4-7.
- [17] 于光辉,翟晓峰,张英,等.微藻固定化技术在环境监测和污水处理中的应用[J].南方农业,2014,8(21):151-152.
- [18] Wahid M H, Eroglu E, Chen X, et al. Entrapment of *Chlorella vulgaris* cells within graphene oxide layers[J]. RSC Advances, 2013, 3(22):8180-8183.
- [19] Przytocka-Jusiak M, Duszota M, Matusiak K, et al.

- Intensive culture of *Chlorella vulgaris*/AA as the second stage of biological purification of nitrogen industry wastewaters[J]. Water Research, 1984, 18(1):1-7.
- [20] 黄邦钦, 黄世玉, 翁妍, 等. 溶解态磷在海洋微藻碱性磷酸酶活力变化中的调控作用[J]. 海洋学报(中文版), 1999, 21(1):55-60.
- [21] 许云, 梁文思, 刘志媛. 2 株微藻对养殖废水中氮磷去除率的影响[J]. 热带生物学报, 2014, 5(3):228-232.
- [22] 胡开辉, 朱行, 汪世华, 等. 小球藻对水体氮磷的去除效率[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2006, 35(6): 648-651.
- [23] 毛欣欣, 蒋霞敏, 钱鹏. 原绿球藻固定化培养去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的效果[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11):3075-3080.
- [24] 丁玉惠, 黄晨, 陈锵, 等. 固定化新月菱形藻的制备及其对 N、P 吸收的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(3):12-18.
- [25] 李飞, 邢丽贞, 闫春玲, 等. 环境因素对微藻去除氮磷的影响[J]. 山东建筑工程学院学报, 2006, 21(3):268-272.
- [26] 丁一, 侯旭光, 郭战胜, 等. 固定化小球藻对海水养殖废水氮磷的处理[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1):336-342.
- [23] 毛欣欣, 蒋霞敏, 钱鹏. 原绿球藻固定化培养去除

Effects of preparation parameters of *Nitzschia closterium* on algae ball properties and removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N/PO}_4^{3-}\text{-P}$

HUANG Chen, JIANG Xiamin*, HAN Qingxi, PENG Ruibing, ZHOU Shuangnan
(School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315832, China)

Abstract: The current study is aimed to prepare a highly efficient immobilized algae ball and improve its preparation process. *Nitzschia closterium* is an algae species. Alginate embedding technique was used in the experiments. The effects of different sodium alginate concentrations (2.0%, 2.5%, 3.0%) and different solvents (seawater, distilled water, NaCl solution) on the shape, strength, mass transfer, as well as nitrogen and phosphorus removal of algae were examined, with the effects of algal cell growth also studied. The results showed that different sodium alginate concentrations produced significant effects on the shape of algae spheres ($P<0.05$). When the concentration of sodium alginate was either 2.0% or 2.5%, the algae spheres were spherical. In contrast, the algae spheres were irregular at a sodium alginate concentration of 3.0%. Solvent types failed to significantly alter the shape of the algae sphere. The concentration of sodium alginate produced a significant effect on the strength of the algae sphere ($P<0.05$). With the increased concentration of sodium alginate, the strength of the algae sphere also increased. The effect of solvent on the strength of algae was significant ($P<0.05$). The strength of algae was sorted by size: seawater>NaCl>distilled water. There was a significant effect of the mass transfer of algae, the concentrations of sodium alginate and solvents ($P<0.05$). As the concentration of sodium alginate increased, the mass transfer of algae gradually increased. In the presence of solvent, mass transfer was evident. The performance was seawater>NaCl>distilled water. The growth of immobilized algae cells was significantly affected by concentrations of sodium alginate and solvents ($P<0.05$). Algae cells with 3.0% sodium alginate+seawater showed the fastest growth speed and the denitrifying phosphorus with 3.0% sodium alginate+seawater showed the greatest efficiency.

Key words: concentration of sodium alginate; solvent species; immobilized *Nitzschia closterium*; algal globular traits; growth rate; ammonia nitrogen and orthophosphate removal efficiency

(责任编辑 史小丽)