

不同氮源对栅藻和小球藻生长及固碳的影响

马咸莹¹, 摆倩文¹, 丁功涛^{2*}

(1. 西北民族大学生命科学与工程学院, 甘肃 兰州 730030;

2. 西北民族大学生物医学研究中心, 甘肃 兰州 730030)

摘要:为应对 CO₂ 引起的温室效应, 利用微藻的光合作用固定 CO₂。选取栅藻、小球藻为研究对象, 以 BG-11 培养基的氮源质量浓度 (247 mg/L) 为标准, 分别以硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐为培养基氮源, 考察在不同氮源种类及质量浓度的培养条件下, 2 种微藻的生长速率、CO₂ 吸收速率。结果表明, 在以亚硝酸钠为氮源、氮元素质量浓度为 247 mg/L 的培养基中, 栅藻的最大比生长速率为 0.040/h, 固碳速率达到最高为 0.036 g/(L·h); 同等条件下, 小球藻的最大比生长速率为 0.030/h, 固碳速率达到最高为 0.023 g/(L·h)。利用栅藻和小球藻固定二氧化碳是一项有效的减排技术。

关键词:栅藻; 小球藻; 氮源; 最大比生长速率; CO₂ 固定速率

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)12-0140-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.12.028

Effects of different nitrogen sources on growth and carbon fixation performance of *Scenedesmus* and *Chlorella*

MA Xian-ying¹, BAI Qian-wen¹, DING Gong-tao^{2*}

(1. Life Sciences and Engineering College, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China;

2. Biomedical Research Center, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China)

Abstract: In order to cope with the greenhouse effect caused by CO₂, the photosynthesis of microalgae is utilized to fix CO₂, and *Scenedesmus sp.* and *Chlorella sp.* are selected as the research objects. Taking the N source concentration of 247 mg·L⁻¹ for BG-11 culture medium as standard, the individual medium with different concentrations of nitrate, nitrite and ammonium salt respectively are applied to growth of microalgae to investigate the performance of the growth and CO₂ fixation rate of two kinds of microalgae. In the culture medium using NaNO₂ as N source with N concentration of 247 mg·L⁻¹, the maximum specific growth rate of *Scenedesmus sp.* is 0.040 per hour, and the CO₂ fixation rate reaches the highest 0.036 g/L/h. Under the same conditions, the maximum specific growth rate of *Chlorella sp.* is 0.030 per hour, and the CO₂ fixation rate reaches the highest 0.023 g/L/h. It is verified that the use of *Scenedesmus* and *Chlorella* to fix carbon dioxide is an effective emission reduction technology and has far-reaching development prospects.

Key words: *scenedesmus sp.*; *chlorella sp.*; nitrogen sources; maximum specific growth rate; CO₂ fixation rate

温室效应已经成为全球经济和社会发展的重要制约因素^[1], 因此, 如何实现 CO₂ 等温室气体减排成为当前科学界的研究热点^[2]。目前, 控制 CO₂ 排放的技术有物理固碳法、化学固碳法、生物固碳法等。物理固碳法和化学固碳法存在技术复杂、费用昂贵、处理效果不理想等问题^[3]。而生物固碳法则是自然界直接实现碳循环的有效途径, 该方法是利用生物体的光合作用来完成生物固碳。利用生物固碳法进行 CO₂ 减排, 尤其是通过微藻固定 CO₂ 的方式受到了广泛关注^[4]。微藻拥有光合速率高、环境适应性较强、繁殖速度快、培养过程可调控等优势,

可实现高效、立体化培育^[2,5]。微藻固碳是一项清洁高效的固碳技术, 该过程不仅提高了微藻固定 CO₂ 过程中的经济性, 同时也实现了碳的利用和循环, 与传统固碳方法比较, 该技术具有广阔的发展前景和经济效益^[6-7]。

近年来国内外研究者对通过微藻固碳来处理 CO₂ 的减排问题进行了大量研究^[8]。日本的 Kurano 等^[9]从釜山海边筛选出的一种海洋绿球藻, 能在 CO₂ 体积分数为 10%~20% 的条件下快速生长。Yoshihara 等^[10]在日本 Kinki 地区海洋中得到一种海藻 *Nannochloris sp. NOA-113*, 培养过程中, 向

收稿日期: 2021-01-22; 修回日期: 2021-10-05

基金项目: 教育部“创新团队发展计划”项目 (IRT-17R88)

作者简介: 马咸莹 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为预防兽医学生物材料的开发与应用, Maxianying1994@outlook.com; 丁功涛 (1984-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为环境生物技术, 通讯联系人, dinggongtao@outlook.com。

微藻培养基通入体积分数为 15% 的 CO_2 , 在培养 5 d 后, 该种微藻的平均固碳速率达 $3.5 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 。Matsumoto 等^[11] 的实验表明, *Nannochloropsis salina*、*Phaeodactylum tricorutum* 及 *Tetraselmis sp. TM-S3* 三种藻在高体积分数 CO_2 的环境下均可以快速生长。Morais 等^[12] 对 *Chlorella Kessleri*、*Chlorella vulgaris*、*Scenedesmus boliquus* 及 *Spirulina sp.* 分别进行研究, 结果表明, 这 4 种藻都可以固定高体积分数 CO_2 。郭祯等^[13] 通过实验证明, 通入一定体积分数的 CO_2 后亚心形扁藻的藻液浓度呈倍数增长。刘玉环等^[14] 在培养微藻的实验中发现, 向微藻培养基中通入体积分数为 33.3% 的 CO_2 , 其最大固碳速率可达到 $0.99 \text{ g}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。用于 CO_2 减排的微藻有很多种, 如衣藻、小球藻、螺旋藻、栅藻、葡萄藻等^[15]。不同微藻固定 CO_2 的效率有明显差异, 据 Hanagata 的实验研究表明, 在筛选得到的 5 种能耐受高体积分数 CO_2 的微藻中, 以斜生栅藻和小球藻效果最好^[16]。氮元素是微藻细胞内蛋白质、核酸、磷脂和叶绿素等的组成元素, 自然界中除少数蓝藻具有自身固氮作用将大气中的氮转化为氨而同化大气中的氮外, 微藻需要从外界获取满足其生长、繁殖需要的氮源, 研究表明, 不同氮源对微藻生长和 CO_2 固定有不同的影响^[17]。

笔者以 BG-11 培养基的氮元素质量浓度为标准, 分别选取硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐作为培养基氮源, 考察在不同种类及质量浓度氮源的培养条件下, 2 种微藻的最大比生长速率、 CO_2 吸收速率。通过不同氮源的平行对比实验确定适宜栅藻、小球藻生长和 CO_2 固定的最优氮源。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

藻种购自中科院水生生物研究所淡水藻种库, 分别为二形栅藻(二形栅藻 FACHB-496)、小球藻(小球藻 FACHB-729)。

培养基所用试剂均为分析纯, 天津市百世化工有限公司生产。

BG11 培养基 (g/L): K_2HPO_4 0.04 g; NaNO_2 1.5 g; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.075 g; CaCl_2 0.016 g; NaCO_3 0.02 g; 柠檬酸 0.006 g; 柠檬酸铁铵 0.006 g; EDTA 0.001 g; H_3BO_3 2.86 g; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.81 g; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.222 g; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.079 g; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.390 g; $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.049 4 g。配制体积为 1 L 的标准 BG-11 培养基, 于 121°C 湿热灭菌

20 min。

1.2 主要仪器与设备

立式压力蒸汽灭菌器, YXQ-LS 型, 上海博讯医疗生物仪器股份有限公司生产; 电热恒温鼓风干燥箱, DHG-9146A 型, 上海精宏实验设备有限公司生产; 照度计, TES1332A 型, 泰仕电子工业股份有限公司生产; 真空抽滤泵, AP-01P 型, 天津奥特赛恩斯仪器有限公司生产; Thermo 紫外分光光度计, 赛摩飞世科技(中国)有限公司生产; 空气压缩机, HY-200 型, 山东宏润空压机科技有限公司生产。

1.3 实验方法

1.3.1 微藻的培养及干重测定

将栅藻藻液及小球藻藻液在无菌条件下接种于 1 L 的标准 BG-11 培养基中, 培养条件: 室温、光照强度为 50 000 lux、光暗比为 12:12, 通气搅拌培养至对数期。在培养期内, 每天不定时取样测定微藻的干重与藻液吸光度, 建立微藻细胞干重与藻液吸光度相关性标准曲线。

微藻细胞干重的测定是通过将孔径为 $1.2 \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜编号后置于 105°C 烘箱内烘干过夜至恒重后称重并记录为 A_1 。吸取藻液 20 mL 用抽滤泵除去培养基, 将带有藻体的滤膜放入 105°C 烘箱内烘干过夜至恒重后称重并记录为 A_2 , 2 次的质量之差即为藻体的干重。微藻干重的计算式为 $W = A_2 - A_1$ 。利用分光光度计测定微藻藻液在波长 750 nm 处的吸光度 A , 从而建立微藻细胞干重与藻液吸光度相关性曲线。

1.3.2 氮源种类对 2 种微藻生长及固碳的影响

通过紫外分光光度法测定单位时间内微藻干重的变化, 以确定培养基中微藻的生长情况, 利用 logistic 模型对实验数据进行拟合得到微藻的最大比生长速率。根据微藻细胞的含碳率及最大比生长速率计算微藻细胞的 CO_2 吸收速率。

取对数期的栅藻和小球藻, 分别接种至以硝酸钠、亚硝酸钠、氯化铵为氮源的 BG-11 培养基中, 氮元素质量浓度为 247 mg/L(硝酸钠、亚硝酸钠、氯化铵的质量浓度分别为 1.500、1.218、0.935 g/L), 每次接种后培养基中微藻的质量浓度为 100 mg/L(栅藻藻液吸光度为 0.185; 小球藻藻液吸光度为 0.146)。采用单批培养方式, 温度为室温, 光照强度约为 50 000 lux, 控制 24 h 光照, 通气(含 2% CO_2 的压缩空气)搅拌, 每组设 3 个平行, 培养周期为 6 d, 每隔 12 h 取样测定栅藻和小球藻的细胞干重。

1.3.3 氮源质量浓度对 2 种微藻生长及固碳的影响

在确定最优氮源的情况下,分别设置氮元素质量浓度为 165 mg/L(亚硝酸钠质量浓度为 0.814 g/L)、247 mg/L(亚硝酸钠质量浓度为 1.218 g/L)、329 mg/L(亚硝酸钠质量浓度为 1.622 g/L),将微藻接种于改良的 BG-11 培养基中,在与 1.3.2 相同的条件下进行培养,每组设 3 个平行,每隔 12 h 取样测定栅藻和小球藻的细胞干重,探究氮源质量浓度对 2 种微藻生长及固碳的影响。

1.3.4 微藻最大比生长速率的计算

微藻的最大比生长速率通过 logistic 模型计算,logistics 模型的积分方程和微分方程分别为^[18]:

$$dx/dt = \mu_{max} \times x \times (1 - x/x_{max}) \quad (1)$$

$$X = X_{max} / [1 + \exp(2 - \mu_{max} t)] \quad (2)$$

式中: X 为单位时间内微藻的生物量; X_{max} 为微藻的最大生物量; μ_{max} 为微藻的最大比生长速率, μ_{max} 通过 origin 软件中的非线性拟合计算。

1.3.5 微藻 CO₂ 固定速率的计算

根据微藻的最大比生长速率和微藻细胞的含碳率计算微藻的 CO₂ 固定速率,计算式如下:

$$R_{CO_2} = P_{max} \times C_c \times (M_{CO_2}/M_c) \quad (3)$$

$$P_{max} = dx/dt = (X_{max} \cdot \mu_{max})/4 \quad (4)$$

式中: R_{CO_2} 为 CO₂ 固定速率, g/(L·h); C_c 为干细胞含碳率,实验中所用栅藻的含碳率为 50%,小球藻的含碳率为 50%;多种微藻元素分析表明,碳元素占生物质干重的比例平均为 50%^[19]; M_{CO_2} 为 CO₂ 分子质量,44; M_c 为 C 的原子质量,12。

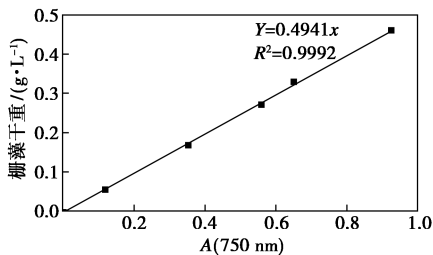
1.3.6 数据处理

将实验结果进行综合统计并利用 Origin 2016 作图。所有数据均以 3 组数据平均值表示。

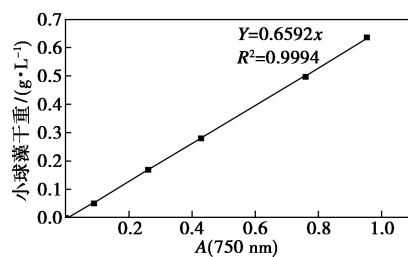
2 结果与分析

2.1 微藻细胞干重与吸光度相关性曲线

以微藻在 750 nm 处吸光度为横坐标,以 1.3.1 所述方法测得微藻干重为纵坐标,分别作出栅藻和小球藻细胞干重与藻液吸光度相关性标准曲线,从而通过测定吸光度确定细胞干重,如图 1 所示。



(a) 栅藻



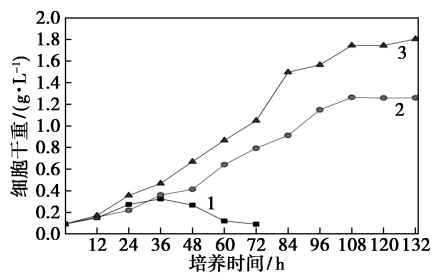
(b) 小球藻

图 1 微藻细胞干重与藻液吸光度相关性曲线

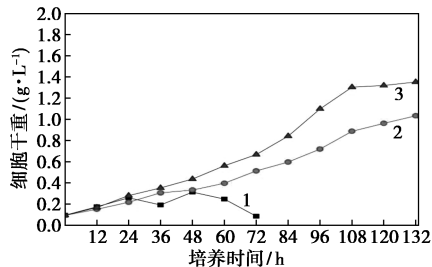
2.2 不同氮源种类对微藻生长及固碳的影响

2.2.1 不同氮源种类对微藻生长的影响

栅藻和小球藻在不同氮源种类下的生长曲线如图 2 所示。



(a) 栅藻



(b) 小球藻

1— $C_{NH_4Cl} = 0.935$ g/L; 2— $C_{NaNO_3} = 1.500$ g/L; 3— $C_{NaNO_2} = 1.218$ g/L

图 2 栅藻和小球藻在不同氮源种类下的生长曲线

从图 2(a)中可以看出,在 3 种不同氮源类型的培养基中,栅藻细胞的生长情况有很大差别。在以亚硝酸钠为氮源培养基中,栅藻的生长状况最好,其生物量明显高于另外 2 种氮源培养基中的栅藻,最大比生长速率为 0.040/h;其次是以硝酸钠为氮源的培养基中的栅藻长势较佳,最大比生长速率为 0.038/h;最后,以氯化铵为氮源的培养基中栅藻生长状况最差,培养 48 h 后栅藻的生物量开始降低,72 h 后栅藻藻液低于接种时的浓度。研究表明,微藻对不同种类的氮营养盐的利用存在着差异^[20]。在添加硝态氮的培养基中栅藻的生长状况最为良好,而在添加铵态氮的培养基中栅藻的生长状况最差^[21]。通常认为浮游植物最先吸收铵态氮,在 GS/

GAGOT 酶的作用下,通过转氨基作用直接合成氨基酸;而硝酸盐和亚硝酸盐则必须经过相应的硝酸还原酶和亚硝酸还原酶生成氨态氮^[22]。多种研究表明,在一定浓度范围内,铵态氮对微藻的生长会起到促进作用,当铵氮浓度超过一定范围,微藻细胞的生长则会受到抑制。与盐胁迫、环境污染物胁迫一样,属于一种逆境胁迫^[23]。故本实验中以氯化铵为氮源的栅藻由于受到氮胁迫的影响,藻液浓度在培养 72 h 后低于起始浓度。在营养盐的利用过程中,硝酸盐转化成亚硝酸盐会转移 2 个电子,亚硝酸盐还原产生铵转移 6 个电子。最后,在谷氨酰胺合成酶的帮助下,铵离子转化为谷氨酰胺。所以,由于最低能量需求,亚硝酸钠是栅藻会优先利用的氮源。

从图 2(b)中可以看出,在 3 种氮源种类不同的培养基中,小球藻细胞的生长状况有很大差别。在亚硝酸钠培养基中,小球藻细胞的生长情况最好,其生物量明显高于另外 2 种氮源培养基中的小球藻,最大比生长速率为 0.030/h;其次是以硝酸钠为氮源的培养基中的小球藻长势较佳,最大比生长速率为 0.025/h;最后,以氯化铵为氮源的小球藻生长状况最差,在培养 60 h 后小球藻的干重开始下降,72 h 后的小球藻低于接种时的浓度。王顺昌^[24]通过实验证明,氨态氮会抑制蛋白核小球藻的生长,该培养基中的小球藻细胞密度与硝态氮相比显著降低。

2.2.2 不同氮源种类对微藻固碳的影响

栅藻和小球藻在不同氮源种类下的 CO₂ 固定速率如表 1 所示。

表 1 栅藻和小球藻在不同氮源种类下的 CO₂ 固定速率

| 微藻种类 | 氮源种类 | CO ₂ 体积分数/% | μ_{\max}/h^{-1} | $X_{\max}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$ | R^2 | $R_{\text{CO}_2}/[\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}]$ |
|------|------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------|
| 栅藻 | 硝酸钠 | 2 | 0.038 | 1.407 | 0.987 | 0.024 |
| | 亚硝酸钠 | 2 | 0.040 | 1.952 | 0.986 | 0.036 |
| 小球藻 | 硝酸钠 | 2 | 0.025 | 1.406 | 0.991 | 0.016 |
| | 亚硝酸钠 | 2 | 0.030 | 1.667 | 0.980 | 0.023 |

注:模型拟合 $P < 0.05$ 。

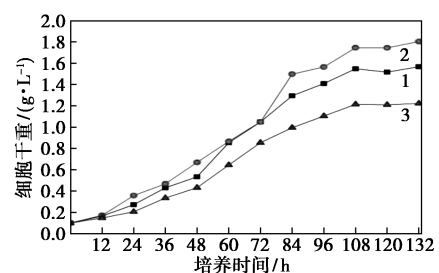
栅藻细胞在以亚硝酸钠为氮源的培养基中生长状况最好,其固碳速率达到 0.036 g/(L·h);以硝酸钠为氮源的培养基中,栅藻的固碳速率为 0.024 g/(L·h);栅藻细胞在氯化铵为氮源、氮元素质量浓度为 247 mg/L 的培养基中不能正常生长,所以本实验对以铵盐为培养基中的栅藻固碳速率不作计算。王辉霞^[25]的实验研究表明,与铵态氮相比,栅藻在硝酸盐培养基中的 CO₂ 固定速率相对较高。

小球藻细胞在以亚硝酸钠为氮源的培养基中的最大比生长速率最高,其固碳速率为 0.023 g/(L·h);在以硝酸钠为氮源的培养基中,小球藻细胞的固碳速率为 0.016 g/(L·h);在以氯化铵为氮源、氮元素质量浓度为 247 mg/L 的培养基中,小球藻细胞不能正常生长,所以对以氯化铵为氮源的小球藻固碳速率不作计算。

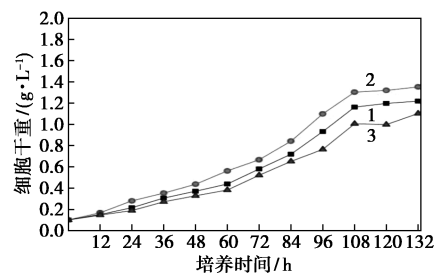
2.3 氮源质量浓度对微藻生长和固碳的影响

2.3.1 氮源质量浓度对微藻生长的影响

栅藻和小球藻在不同氮源质量浓度下的生长曲线如图 3 所示。



(a) 栅藻



(b) 小球藻

1— $C_{\text{NaNO}_2} = 0.814 \text{ g/L}$; 2— $C_{\text{NaNO}_2} = 1.218 \text{ g/L}$; 3— $C_{\text{NaNO}_2} = 1.622 \text{ g/L}$

图 3 栅藻和小球藻在不同氮源质量浓度下的生长曲线

从图 3(a)中可以看出,当培养基中亚硝酸钠的质量浓度升高时,栅藻细胞的生物量也在增大。当氮元素质量浓度为 165 mg/L 时,栅藻细胞的最大比生长速率为 0.034/h;当氮元素质量浓度为 247 mg/L 时,栅藻细胞的最大比生长速率为 0.040/h;当氮元素质量浓度为 329 mg/L 时,栅藻细胞的最大比生长速率为 0.033/h。王珂^[26]的实验表明,微藻的生长状况会受到氮元素质量浓度的影响,氮是微藻细胞合成氨基酸的主要来源,在微藻细胞的生长环境中保持一定的氮质量浓度才能够保证微藻细胞的正常生长,质量浓度过低的氮源会导致微藻细胞营养不足,影响细胞内三羧酸循环的正常进行及细胞内的叶绿素合成,使微藻的光合系统受到损伤,导致光合速率下降,细胞生长停滞。常婷^[27]通过实验证明,

随着培养时间的延长,培养基中的氮源被逐渐消耗时,微藻细胞的生长指标如生物量、细胞密度等都会下降。但是氮质量浓度过高也会使细胞经同化过程产生的铵无法快速转化为氨基酸,进一步导致细胞铵中毒,微藻细胞的生长将会受到影响,还会导致微藻细胞的死亡^[28]。高质量浓度铵盐对微藻细胞的生长会产生抑制,而且质量浓度越高的铵盐对微藻细胞的抑制作用越显著。而对于非铵盐组,高氮更有利于生物量的积累^[29]。所以栅藻细胞在氮元素质量浓度为 247 mg/L 的培养基中最大比生长速率最高,说明 BG-11 培养基本身的氮质量浓度已经足够栅藻细胞生长利用,过高质量浓度的氮元素会对栅藻的生长产生抑制。

从图 3(b)中可以看出,当亚硝酸钠质量浓度升高时,小球藻细胞的生物量也在增大。当氮元素质量浓度为 165 mg/L 时,小球藻细胞的最大比生长速率为 0.029/h;当氮元素质量浓度为 247 mg/L 时,小球藻细胞的最大比生长速率为 0.030/h;当氮元素质量浓度为 329 mg/L 时,小球藻细胞的最大比生长速率为 0.028/h。在氮元素质量浓度为 247 mg/L 的培养基中,小球藻细胞的最大比生长速率最高,说明 BG-11 培养基本身的氮元素质量浓度已经足够小球藻细胞生长利用,氮元素质量浓度太高会使小球藻细胞的生长受到抑制。

2.3.2 氮源质量浓度对微藻固氮的影响

栅藻和小球藻在不同氮源浓度下的 CO₂ 固定速率如表 2 所示。

表 2 栅藻和小球藻在不同氮源浓度下的 CO₂ 固定速率

| 微藻种类 | 氮源质量浓度/(mg·L ⁻¹) | CO ₂ 体积分数/% | μ_{\max}/h^{-1} | $X_{\max}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$ | R^2 | $R_{\text{CO}_2}/[\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}]$ |
|------|------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------|
| 栅藻 | 165 | 2 | 0.034 | 1.732 | 0.962 | 0.027 |
| | 247 | 2 | 0.040 | 1.952 | 0.964 | 0.036 |
| | 329 | 2 | 0.033 | 1.365 | 0.965 | 0.021 |
| 小球藻 | 165 | 2 | 0.029 | 1.523 | 0.971 | 0.020 |
| | 247 | 2 | 0.030 | 1.667 | 0.980 | 0.023 |
| | 329 | 2 | 0.028 | 1.362 | 0.977 | 0.017 |

注:模型拟合 $P < 0.05$ 。

当培养基中亚硝酸钠的质量浓度升高时,栅藻最大比生长速率也在增大,当氮元素质量浓度为 165、247 mg/L 时,栅藻的固碳速率分别为 0.027、0.036 g/(L·h)。氮元素质量浓度为 329 mg/L 的亚硝酸盐抑制了栅藻细胞的生长,所以该质量浓度下的栅藻固碳速率最低,为 0.021 g/(L·h)。王辉

霞^[24]的实验结果也表明,栅藻在以亚硝酸钠为氮源的培养基中的生长状况较好,随着培养基中的氮元素质量浓度增大,栅藻细胞的最大比生长速率及固碳速率也在增加。

当亚硝酸钠质量浓度增大时,小球藻的最大比生长速率也在增大,当培养基中的氮源质量浓度为 165、247 mg/L 时,小球藻的固碳速率分别为 0.020、0.023 g/(L·h);质量浓度为 329 mg/L 的亚硝酸钠会抑制小球藻细胞的生长,所以该质量浓度下的小球藻固碳速率最低,为 0.017 g/(L·h)。

不同微藻固定 CO₂ 速率的对比结果如表 3 所示。

表 3 不同微藻固定 CO₂ 速率的对比

| 藻种 | 氮源 | 氮质量浓度/(mg·L ⁻¹) | μ_{\max}/h^{-1} | $R_{\text{CO}_2}/[\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}]$ | 参考文献 |
|--------|------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------|------|
| 二形栅藻 | 亚硝酸钠 | 247 | 0.040 | 0.036 | 本实验 |
| 斜生栅藻 | 硝酸钠 | 200 | — | 0.002 | [25] |
| 蛋白核小球藻 | 硝酸钠 | 250 | — | 0.127 | [3] |

从表 3 中可以看出,本实验中所选取的二形栅藻固碳速率高于斜生栅藻,为 0.036 g/(L·h),原因是亚硝酸钠较硝酸钠更适合栅藻生长利用,且用于培养二形栅藻的氮元素质量浓度较高,更有利于二形栅藻的生长。在 3 种微藻中蛋白核小球藻固定 CO₂ 的速率最高,原因是不同藻种对于氮源的吸收利用各不相同,且氮源质量浓度对微藻细胞的生长也有很大的影响。

3 结论

在选取的 3 种氮源(硝酸钠、亚硝酸钠、和氯化铵)中,亚硝酸钠对微藻生长和固碳的影响最大。当氮元素质量浓度为 247 mg/L 时,栅藻细胞的最大比生长速率为 0.040/h,固碳速率最高,为 0.036 g/(L·h);当氮元素质量浓度为 247 mg/L 时,小球藻细胞的最大比生长速率为 0.030/h;固碳速率最高,为 0.023 g/(L·h)。

参考文献

- [1] 巢清尘.全球气候治理的学理依据与中国面临的挑战和机遇[J].阅江学刊,2020,12(1):33-43,120-121.
- [2] 韩骥,周翔,象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展[J].生态学报,2016,36(4):1152-1161.
- [3] 杨启鹏.蛋白核小球藻固定高浓度 CO₂ 的试验研究[D].青岛:青岛理工大学,2009.
- [4] Tebbani S, Lopes F, Filali R, et al. Nonlinear predictive control for

- maximization of CO₂ bio-fixation by microalgae in a photobioreactor [J]. *Bioprocess & Biosystems Engineering*, 2014, 37(1): 83-97.
- [5] Keffer J E, Kleinheinz G T. Use of *Chlorella vulgaris* for CO₂ mitigation in a photobioreactor [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2002, 29(5): 275-280.
- [6] 厉雄峰, 李清毅, 胡达清, 等. 微藻生物固碳法在煤电碳减排应用的研究进展 [J]. *化工进展*, 2016, 35(s2): 347-351.
- [7] 杨忠华, 杨改, 李方芳, 等. 利用微藻固定 CO₂ 实现碳减排的研究进展 [J]. *生物加工过程*, 2011, 09(1): 66-75.
- [8] 罗智展, 舒璇, 许瑾, 等. 利用微藻处理污水的研究进展 [J]. *水处理技术*, 2019, 45(10): 17-23, 39.
- [9] Kurano N, Ikemoto H, Miyashita H, *et al.* Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis [J]. *Energy Conversion & Management*, 1995, 36(6): 689-692.
- [10] Yoshihara K I, Nagase H, Eguchi K, *et al.* Biological elimination of nitric oxide and carbon dioxide from flue gas by marine microalga NOA-113 cultivated in a long tubular photobioreactor [J]. *Journal of Fermentation & Bioengineering*, 1996, 82(4): 351-354.
- [11] Matsumoto H, Shioji N, Hamasaki A, *et al.* Carbon dioxide fixation by microalgae photosynthesis using actual flue gas discharged from a boiler [J]. *Applied Biochemistry & Biotechnology*, 1995, 51-52(1): 681-692.
- [12] Morais M G D, Costa J A V. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Spirulina*, sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors [J]. *Biotechnology Letters*, 2007, 29(9): 1349-1352.
- [13] 郭祯, 陈兆安, 陆洪斌, 等. CO₂ 对亚心形扁藻生长及光合放氧的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(6): 779-783.
- [14] 刘玉环, 阮榕生, 孔庆学, 等. 利用市政废水和火电厂烟道气大规模培养高油微藻 [J]. *生物加工过程*, 2008, 6(3): 29-33.
- [15] 王霞, 张涛, 童丹. 钝顶螺旋藻固定二氧化碳效率的研究 [J]. *湖北工业大学学报*, 2015, (5): 12-15.
- [16] Hanagata N, Takeuchi T, Fukuyu Y, *et al.* Tolerance of microalgae to high CO₂, and high temperature [J]. *Phytochemistry*, 1992, 31(10): 3345-3348.
- [17] 王倩雅, 罗舒怀, 张莹, 等. 不同初始氮浓度下尖状栅藻同化硝态氮和 CO₂ 的研究 [J]. *植物科学学报*, 2017, 35(4): 583-591.
- [18] Ding G T, Yaakob Z, Takriff M S, *et al.* Biomass production and nutrients removal by a newly-isolated microalgal strain *Chlamydomonas* sp in palm oil mill effluent (POME) [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(8): 4888-4895.
- [19] Vermaas W F J. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology* [M] // *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, 2004.
- [20] 李静雅. 普通小球藻无污染培养、氧胁迫缓解及油脂积累的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [21] 刘平怀, 郝宗娣, 杨勋, 等. 不同氮源对 2 种微藻生长及总脂含量的影响 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(8): 1429-1433.
- [22] 胡章喜, 徐宁, 段舜山. 不同氮源对 4 种海洋微藻生长的影响 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2452-2457.
- [23] 潘禹, 王华生, 刘祖文, 等. 微藻废水生物处理技术研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2490-2500.
- [24] 王顺昌, 王陶, 赵世光, 等. 不同氮源对蛋白核小球藻生长、色素和中性脂肪积累的影响 [J]. *激光生物学报*, 2008, 17(2): 197-201.
- [25] 王辉霞. 富油斜生栅藻固定 CO₂ 的试验研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [26] 王珂. 不同光强和氮源条件下类波氏真眼点藻的生长、油脂积累和尿素代谢规律研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2014.
- [27] 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 等. 不同氨氮浓度对 4 株常见藻株生长及酶活性的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3642-3649.
- [28] Dai G Z, Qiu B S, Forchhammer K. Ammonium tolerance in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. strain PCC 6803 and the role of the *psbA* multigene family [J]. *Plant Cell & Environment*, 2014, 37(4): 840-851.
- [29] 孟鸽, 黄罗冬, 高保燕, 等. 氮源类型和水平对 3 株球状绿藻生长、油脂和花生四烯酸积累的影响 [J]. *微生物学通报*, 2018, 45(12): 2624-2638. ■
- [12] 苏玉芹, 刘晓玲, 张佐光. 大孔偕胺脒树脂的合成及其对镓的吸附性能 [J]. *过程工程学报*, 2010, 10(5): 893-898.
- [13] Long H M, Zhao Z, Chai Y Q, *et al.* Binding mechanism of the amidoxime functional group on chelating resins toward gallium (III) in bayer liquor [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(33): 8025-8030.
- [14] 邓茂盛, 黄英, 冯志军, 等. 偕胺脒螯合材料合成与应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2015, 29(23): 36-46.
- [15] Xiong J, Xu Y S, Huang W. Amidoxime group chelating adsorption and separation materials research [J]. *Materials Review*, 2006, 20(7): 102-108.
- [16] 李敏. 选择性识别 AuCl₄⁻ 吸附材料的制备及其性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [17] 苏玉芹, 刘晓玲, 张佐光. 大孔偕胺脒树脂的合成及其对镓的吸附性能 [J]. *过程工程学报*, 2010, 10(5): 893-898.
- [18] Mohamed M Hassanien, Wael I Mortada, Ibrahim M Kenawy, *et al.* Solid phase extraction and preconcentration of trace gallium, indium, and thallium using new modified amino silica [J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71(2): 288-299.
- [19] Meng J J, He C L, Zhou J, *et al.* Recovery of gallium by silica-based polymer TBP/SiO₂-P obtained from hydrochloric acid solution [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 138(4): 1-10.
- [20] Xiong Y, Cui X X, Zhang M M, *et al.* Microwave hydrothermal synthesis of gallotannin/carbon nanotube composites for the recovery of gallium ion [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 510: 1-10.
- [21] Zhao Z, Li X H, Chai Y Q, *et al.* Adsorption performances and mechanisms of amidoxime resin toward gallium (III) and vanadium (V) from bayer liquor [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 4(1): 53-59.
- [22] Zhang Y Y, Zhu L, Wang Y, *et al.* Preparation of a biomass adsorbent for gallium (III) based on corn stalk modified by iminodiacetic acid [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2018, 91: 291-298.
- [23] 薛小艳, 李鹤飞, 安富强. 氨基硫脲功能化 D301 树脂的制备及其对 AuCl₄⁻ 的吸附与选择性研究 [J]. *应用化工*, 2018, 47(9): 1821-1825. ■

(上接第 139 页)