

碳酸酐酶附着膜在微藻直接空气碳捕集中的应用与固碳性能的强化

王睿龙^{1,2}, 李明佳³, Sandra KENTISH⁴

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学热流科学与工程教育部

重点实验室, 710049, 西安; 3. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 100081, 北京;

4. 墨尔本大学化学工程学院, 帕尔维尔, 维多利亚州, 3010, 澳大利亚)

摘要: 为了解决低浓度直接空气碳捕集条件下微藻光生物反应器内 CO_2 传质效率差、溶解度低的问题, 采用实验的方法制备了碳酸酐酶(CA)附着的尼龙纤维膜, 利用 CA 催化转化 CO_2 为碳酸氢根的性质, 提出了一种可以改善微藻溶液中 CO_2 溶解度及转化率的新型光生物反应器, 测试了该反应器放置 CA 附着尼龙纤维漂浮膜前后的微藻培养和固碳性能, 并进一步探究了膜的开孔率及 CA 附着量对微藻固碳率的影响。实验结果表明: 所制备的 CA 附着的尼龙纤维膜对 CO_2 转化率提升了 62.7%, 通过耐久性测试, CA 的活性在 5 个培养周期后仍保持良好, 性能衰减仅为 11.3%; 与传统气石鼓气方式相比, 提出的新型光生物反应器的微藻质量浓度提高了 29.7%, 固碳率提升了 65%; 随着膜开孔率的增加和透光率的增加, 单位 CA 负载质量的固碳率提高, 开孔面积占比 24.75% 的对照组的单位 CA 固碳率相比不开孔提高了 13%。该研究为进一步提高微藻直接空气捕集的固碳率提供了一种新的方法。

关键词: 微藻光生物反应器; 直接空气碳捕集; 碳酸酐酶; 尼龙纤维膜

中图分类号: TK12 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202409002 **文章编号:** 0253-987X(2024)09-0011-08

Application of Carbonic Anhydrase Membrane in Direct Air Carbon Capture by Microalgae and Enhancement of Carbon Sequestration Performance

WANG Ruilong^{1,2}, LI Mingjia³, Sandra KENTISH⁴

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. MOE Key Laboratory of

Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. Department of Chemical Engineering,

The University of Melbourne, Parkville, Victoria 3010, Australia)

Abstract: To address the challenges of low CO_2 mass transfer efficiency and solubility in microalgae photobioreactors in direct air carbon capture, this paper employs experimental methods to prepare a nylon fiber membrane coated with carbonic anhydrase (CA). By utilizing CA's catalytic properties to convert CO_2 into bicarbonate, a novel photobioreactor is proposed to enhance CO_2 solubility and conversion rate in microalgae solutions. The reactor's performance, with and without the CA-coated nylon floating membrane, is evaluated for microalgae cultivation and carbon sequestration. Furthermore, the impact of membrane porosity and CA loading on carbon

收稿日期: 2024-03-10。 作者简介: 王睿龙(1997—), 男, 博士生; 李明佳(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目:

国家自然科学基金资助项目(52293413, 52076161)。

网络出版时间: 2024-04-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20240426.1302.005>

fixation efficiency is investigated. The experimental results demonstrate that the prepared CA-coated nylon fiber membrane increases the CO₂ conversion rate by 62.7%. Through durability testing, the CA activity remains robust even after five cultivation cycles, with only an 11.3% decline in performance. Compared to traditional aeration methods, the novel photobioreactor increased microalgae biomass production by 29.7% and carbon sequestration efficiency by 65%. Moreover, an increase in membrane porosity and light transmittance enhances the carbon sequestration efficiency per unit of CA loading, showing a 13% improvement in the carbon fixation rate per unit of CA for the control group with a 24.75% open area ratio compared to the non-porous control. This study provides a novel approach for further enhancing the carbon sequestration efficiency of microalgae in direct air capture.

Keywords: microalgae photobioreactor; direct air carbon capture; carbonic anhydrase; nylon membrane

随着工业化进程的加速和人类城市化规模的不断扩大,二氧化碳等温室气体的大量排放引发了诸多环境问题,例如气候变暖和土地沙漠化等。因此,碳捕集、利用和存储技术(CCUS)成为了能源环境领域的研究热点^[1]。目前,常见的CCUS技术包括物理吸附、化学捕集、地质封存等^[2],多集中在从大型固定排放源(例如热电厂等)捕获CO₂。相比之下,以低浓度CO₂为碳源的直接空气碳捕集技术(DACC)可以直接从大气中捕获CO₂,以减轻大气中的CO₂浓度^[3],不依赖于固定的排放源,具有能耗低、可移动、分布式布置等特点,可以作为传统CCUS技术的补充,具有广泛的应用前景。其中,以微藻为主的光合作用生物因其高效的碳捕集能力、较小的占地需求和低能耗等特点,已逐渐发展成了碳捕集技术的重要手段之一^[4-5]。

在以往的研究中,通过改进光生物反应器设计^[6]、优化微藻培养条件^[7]、改良光生物反应器的进气系统^[8]和提高CO₂传质效率^[9-10]等方法,可以显著提升微藻的固碳率,但传统微藻固碳技术对碳源浓度要求较高,在低浓度直接空气碳捕集中难以取得显著的固碳效果。研究结果表明,最适宜微藻生长的CO₂体积分数 φ_{CO_2} 范围为3%~5%^[11],因此直接从大气(CO₂体积浓度为0.03%)中进行碳捕集的效率偏低,无法满足零碳排放的要求。为了提升直接空气碳捕集的效率,学者们提出了利用膜反应器增强CO₂与微藻的接触面积^[12-13],同时改善进气气泡尺寸的方法^[14-15],从而显著提高了微藻的固碳率^[16]。Wang等^[12]提出了一种基于聚偏氟乙烯/聚乙烯吡咯烷酮(PVDF/PVP)改性的静电纺丝纤维膜接触式微藻光生物反应器,利用膜作为微藻的载体,有效提升了溶液中微藻细胞与游离态CO₂的

接触面积,同时可以快速地实现微藻收获。尽管如此,膜反应器的耐久性较差,对溶液内CO₂的富集也难以完全满足直接空气碳捕集的需求,仍需进一步探索辅助方法以提高效率和改进耐久性^[17]。碳酸酐酶(CA)作为一种催化CO₂和碳酸之间转化的酵素,因其在活性位点中含有锌离子而能有效提升CO₂的传质效率和溶解度^[18],为直接空气碳捕集技术提供了进一步优化的方向,其转化原理如下式



碳酸酐酶在碳捕集、分离和应用过程中扮演着关键角色,可以有效加快CO₂向碳酸氢根溶液的高效率溶解,实现CO₂的富集和溶液中碳浓度的提升^[19]。在以往的研究中,碳酸酐酶也被广泛应用于碳捕集过程中^[20]。例如,Fu等^[21]开发的含碳酸酐酶的超薄酶液膜,通过其特有的直径8 nm的亲水孔呈堆积阵列排布结构,显著提高了CO₂的分离和捕获效率。在微藻等光合作用生物的培养中,碳酸酐酶的应用尚显有限。Xu等^[22]提出了利用游离态的碳酸酐酶小球混入微藻溶液中,有效缓解了微藻应用于直接空气碳捕集中碳含量不足的问题。Jun等^[23]通过酶沉积涂层(EPC)的方式将碳酸酐酶固定在电纺聚合物纳米纤维上,在鼓泡式CO₂反应器中微藻的生长速率提升了134%。然而,目前应用在光生物反应器内碳酸酐酶的稳定性和耐用性较差,且往往需要采用空气鼓泡式或额外的CO₂输入,造成了额外的能耗,限制了其在此过程中的应用潜力。

基于现有的研究基础,本文创新性地提出了一种附着碳酸酐酶的尼龙膜微藻光生物反应器,旨在提高低浓度CO₂直接空气捕集环境下的微藻固碳

率。通过层堆积法(LbL)将碳酸酐酶附着在多孔材质的尼龙纤维膜上,并将纤维膜以漂浮的方式放置于跑道池光生物反应器微藻溶液的表面。本文首先采用 Wilbur-Anderson 方法,分析了尼龙纤维膜表面的碳酸酐酶的负载效果和性能,证明了层堆积法能够有效地实现 CA 在尼龙膜表面的附着;其次,通过设置对照实验方案,比较了传统气石进气方式与附着碳酸酐酶的膜反应器内微藻的生长速率和固碳率,明确了碳酸酐酶对于提高低浓度 CO₂ 环境下微藻固碳的积极作用;最后,通过实验揭示了不同透光率和碳酸酐酶负载质量对微藻固碳率的影响规律,为进一步提高直接空气碳捕集技术的固碳率提供了理论支持和实验验证。

1 实验方法及研究方案

1.1 微藻光生物反应器

实验所使用的微藻藻种为普通小球藻,获取自澳大利亚 CSIRO 藻种库。以 0.15 g · L⁻¹ 的初始质

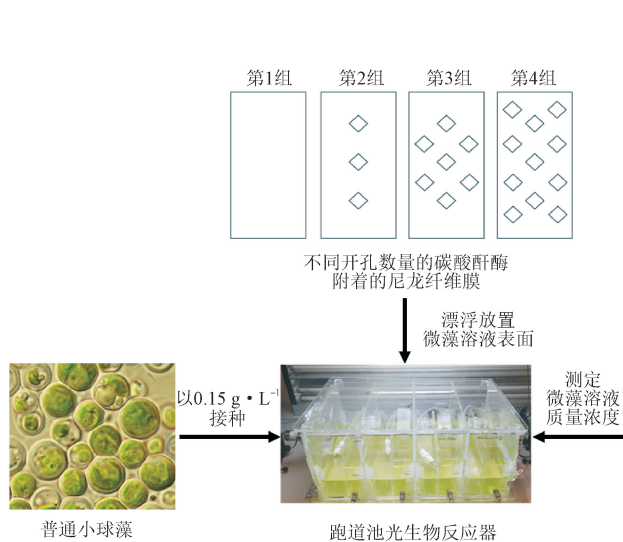


图 1 跑道池光生物反应器实验系统

Fig. 1 Schematic of raceway pond microalgae system

1.2 碳酸酐酶的附着和测定

实验通过层堆积法^[8]将稀释的碳酸酐酶溶液利用静电吸附的原理涂覆在尼龙纤维膜上。首先,采用聚乙 烯 亚 胺 (polyethylenimine 25 kg/mol, PEI, sigma-aldrich)、聚 苯 乙 烯 磺 酸 钠 (polystyrene sulfonate 70 kg/mol, PSS, sigma-aldrich)、聚 烯 丙 胺 盐 酸 盐 (polyallylamine hydrochloride 10 kg/mol, PAH, sigma-aldrich) 3 种带不同电荷的聚电解质形成不同带正负电荷的层,这些聚电解质和碳酸酐酶均在 Tris 缓冲液 (50 mmol · L⁻¹, pH 值为 8.5) 中

量浓度接种到如图 1 所示的微藻跑道池光生物反应系统中培养,跑道池反应器中微藻溶液部分的容积为 5 L,单个跑道池的长、宽、高分别为 300、120 和 200 mm,中间分隔的挡板放置于跑道池中央,长度为 200 mm,采用中央连杆连接的浆轮在跑道池反应器内部匀速转动以混合微藻溶液,连杆与可调速的 12 V 电机连接,图 2 展示了单个跑道池的尺寸参数示意图。浆轮由 5 个长为 70 mm、宽为 30 mm 的长方形板组成。跑道池光生物反应器实验系统由 4 个相同尺寸的跑道池组成,便于同时进行平行实验。基于前期的研究基础,选择淡水藻种 (MLA) 培养基用于培养微藻,培养基由 49.10 mg · L⁻¹ MgSO₄ · 7H₂O、170.00 mg · L⁻¹ NaNO₃、34.80 mg · L⁻¹ K₂HPO₄、2.40 mg · L⁻¹ H₃BO₃、16.80 mg · L⁻¹ NaHCO₃、29.40 mg · L⁻¹ CaCl₂ · 2H₂O、0.001 2 mg · L⁻¹ H₂SeO₃ 以及维生素和微量营养物组成。

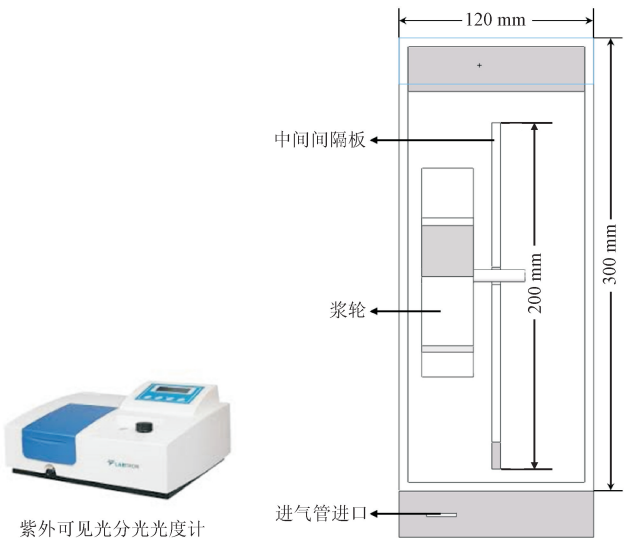


图 2 单个跑道池尺寸参数示意图

Fig. 2 Diagram of size parameters of a single raceway pond

以 1 g · L⁻¹ 的质量浓度溶解。交替层的聚电解质和碳酸酐酶依次按照 PEI、PSS、PAH 的顺序沉积在膜表面,完成后按照 PSS、PAH、CA 的顺序附着碳酸酐酶,按照所需附着的层数重复进行 PSS、PAH、CA 的附着。通过这种方法,实现了对 CA 附着层数的精确控制,以往的研究结果表明^[24-25],随层数增加 CA 的负载质量因静电力减弱而降低,从第 1 层的 96 ng · cm⁻² 降至第 3 层的 11 ng · cm⁻²。经过理论和实验结果优选,最终选定 3 层碳酸酐酶附着为最佳方式,将尼龙纤维膜按顺序浸入每种聚电解质和 CA

溶液中 3 min 后用超纯水冲洗 5 min 的步骤,完成了聚电解质和 CA 溶液的制备及 CA 在膜上的附着过程。

实验通过层堆积法成功实现了 CA 在尼龙纤维膜的附着,随后采用 Wilbur-Anderson(W-A)方法评估了碳酸酐酶的活性^[26]。W-A 方法利用 CA 催化 CO₂ 转化为碳酸氢根的能力,通过监测弱碱性溶液在通入 CO₂ 后溶液 pH 值下降的速率来测定 CA 的活性。为了定量描述 CA 活性,引入了 Wilbur-Anderson 单位(设为 U_{WA})来表示空白组和待测样品组的 pH 值下降时间的比值,定义如下式

$$U_{WA} = \frac{T_c}{T_s} - 1 \tag{2}$$

式中: T_c 、 T_s 分别表示空白对照组(仅缓冲液)和待测样品组 pH 值从 8.3 降至 7.3 所需的时间。在 4℃ 的冰浴环境中进行实验,以维持测试过程中 pH 值的稳定性。通过持续鼓气的方式向超纯水中通入 CO₂ 至达到饱和,获得饱和碳酸水。将附着 CA 的尼龙纤维膜样品浸入 12.6 mL 的 Tris 缓冲液中(50 mmol·L⁻¹, pH 值为 8.3),并加入 6 mL 的饱和碳酸水,使用 pH 计(S220 Seven Compact,美国 Mettler Toledo 公司)及配套的 pH 温度联合探头,测定加入饱和碳酸水前后 pH 值的变化情况。

1.3 实验方案设计与微藻固碳率计算

为了探究 CA 附着尼龙膜对微藻固碳率的影响,采用对照实验的方式开展研究。在跑道池光生物反应器内对微藻进行了连续 7 d 的培养,定期测定其生长速率和固碳率。每个对照组分别进行了

3 次重复实验,以保证实验的可重复性。通过设置不同情况的 7 组对照组,按照表 1 所示的方案开展实验。其中,对照组的设计依据主要从外部进气对反应器性能的影响(方案 1 和 2)、添加尼龙膜对反应器性能的影响(方案 2 和 3)、膜表面附着 CA 对反应器性能的影响(方案 3 和 4)以及 CA 附着量与透光量对反应器性能的影响(方案 4~7)等 4 个方面进行设计。为了研究透光量和 CA 附着量对反应器固碳性能的影响规律,防止漂浮膜对光生物反应器的光照产生遮蔽,采取在膜表面均匀开孔的方式,探讨了光照强度、CA 附着量和微藻固碳率的关系。开孔方式及对照组示意图如图 3 所示。分别在膜上等间距开孔 3、7 和 11 个,对应的孔面积记为 S_1 ,膜面积记为 S_2 。本实验中使用的尼龙纤维膜由美国 STERLITECH 公司提供,孔径为 5.0 μm,尺寸为 200 mm×200 mm,对应的尺寸和位置参数在图 3 上进行了标注。

表 1 对照实验方案

Table 1 Schemes of the controlled experiments

方案	进气方式	膜材料	$S_1 \cdot S_2^{-1}$
1	气石鼓气	无膜	
2	无额外进气	无膜	
3	无额外进气	仅尼龙膜	0
4	无额外进气	附 CA 尼龙膜	0
5	无额外进气	附 CA 尼龙膜	7.5%
6	无额外进气	附 CA 尼龙膜	15.75%
7	无额外进气	附 CA 尼龙膜	24.75%

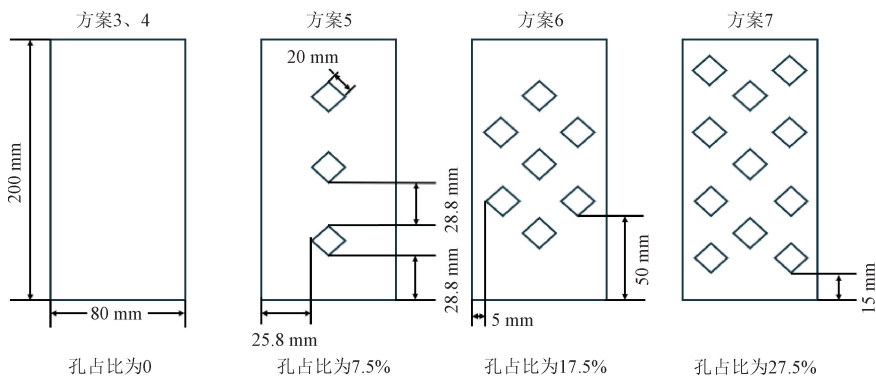


图 3 开孔方式及对照组示意图

Fig. 3 Diagram of membrane with holes and controlled groups

实验通过测定微藻溶液吸光度来确定微藻质量浓度(设为 c)。利用兰博比尔定律(Lamber-Beer Law),在特定波长(683 nm)下,微藻溶液吸光度(A_{683})与微藻质量浓度 c 成正比,通过测定已知质

量浓度的微藻溶液吸光度,确定了微藻质量浓度计算公式

$$c = 0.387A_{683} + 0.009\ 57 \tag{3}$$

为了进一步确定微藻固碳率,可以通过微藻

细胞内的碳含量计算微藻的碳捕获量,表达式如下

$$R_c = \frac{c_{t+\Delta t} - c_t}{\Delta t} C_c \frac{M_{CO_2}}{M_c} \tag{4}$$

式中: C_c 是微藻细胞内碳的质量分数,文献[27] 研究表明 C_c 为 51%; M_{CO_2} 和 M_c 表示 CO_2 和 C 的相对分子质量,分别为 44 和 12。

2 结果与讨论

2.1 碳酸酐酶对 CO_2 溶解性能的影响特性

为了评估 CA 对 CO_2 的溶解性能和在膜表面的附着特性,使用 W-A 方法测定了附着 CA 前后尼龙纤维膜在碳酸氢根转化效率方面的性能。无 CA 附着的空白组 pH 值随时间的变化规律如图 4 所示。为了保证数据的准确性,在不同时间进行了 10 组测试,记录 pH 值从 8.3 下降到 7.3 的时间。结果显示, T_c 的平均值为 (102 ± 11) s。这一数据为进一步评价尼龙纤维膜碳酸氢根转化效率的影响提供了基准。通过层堆积法附着 CA 后尼龙纤维膜的 W-A 方法测试结果如图 5 所示,尼龙纤维膜在将 CO_2 转化为碳酸氢根的能力上有了明显提升,转化速率(即 pH 值下降速率)加快了 62.7%。由式(2)计算得到的 CA 附着后的尼龙纤维膜 Wilbur-Anderson 单位 U_{WA} 为 1.68,证明了碳酸酐酶可成功地附着在尼龙纤维膜上。进一步的稳定性测试实验结果表明,尼龙纤维膜在类似微藻生长环境的 Tris 缓冲液(pH 值为 8.0)中浸泡 5 d 后,碳酸酐酶的活性几乎未受影响, U_{WA} 稳定在 1.49,相比于附着初期仅下降了 11.3%。这表明碳酸酐酶附着具有良好的稳定性,能够在微藻培养过程中提供持续的 CA 活性。

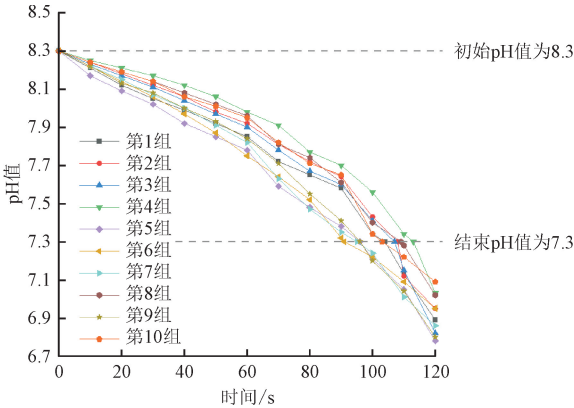


图 4 W-A 方法测定的溶液 pH 值随时间的变化规律 (10 组重复实验)

Fig. 4 Changes of pH value in solution of W-A method assay over time (10 repeated experiments)

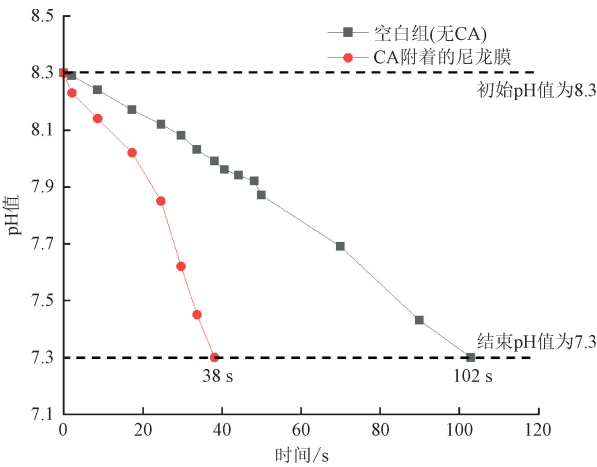


图 5 附着碳酸酐酶前后尼龙膜的 W-A 方法测试结果
Fig. 5 W-A method test results of nylon membrane before and after CA attach

2.2 碳酸酐酶附着对微藻生长固碳性能的影响规律

在本研究中采用 CA 附着的尼龙纤维膜,并将其应用于如图 1 所示的跑道池光生物反应器实验系统中,以探究其对微藻生长固碳率的影响。通过使用支架固定在尼龙膜底部,防止其在水中沉降。实验按照表 1 所示的对照组方案 1~4 和方案 5~7 分别在 7 d 的连续培养期间,每 24 h 测定一次微藻质量浓度,得到了如图 6、7 所示的微藻质量浓度随时间的变化。实验结果表明,CA 的附着显著提高了微藻在光生物反应器中的生长速率。相较于传统的气石鼓气培养方式,利用 CA 附着的尼龙纤维膜不仅降低了能耗,还将微藻质量浓度提升了 29.7%。此外,与无膜对照组及有膜但未附着 CA 的对照组相比,附着 CA 的尼龙漂浮膜方案使微藻质量浓度提高了 51%,且方案 1 无膜无额外进气和方案 3 尼龙膜无额外进气的对照组生长速率接近,证明了附着 CA 是提高微藻生长固碳率的原因,CA 通过改变尼龙膜两边的 CO_2 压力差,提高了空气中 CO_2 的吸收效率和向微藻溶液中转化的效率,进而促进了微藻在跑道池光生物反应器内的生长。

方案 1~7 中不同对照组的微藻固碳率如图 8 所示。实验结果表明,在膜表面附着碳酸酐酶后,微藻光生物反应器的固碳率得到了显著的提升。相较于实验室传统的气石鼓气方式,采用 CA 尼龙膜的对照组的每天每升微藻固碳率提升了 65%。相较于附着 CA 前的仅尼龙膜或无膜的对照组,附着 CA 后光生物反应器的固碳率约提升了 136%。

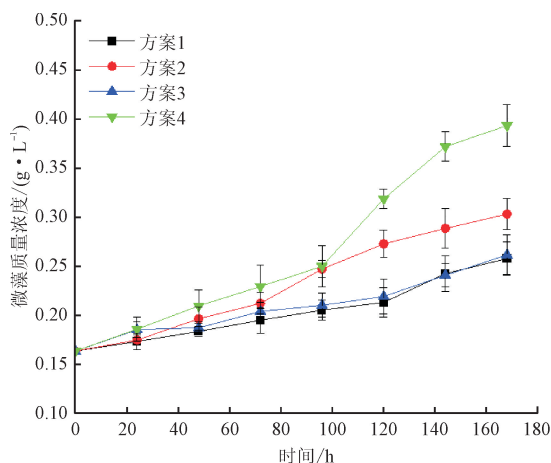


图6 方案1~4时微藻质量浓度随时间的变化

Fig. 6 Microalgae biomass growth curve with time (schemes 1—4)

2.3 碳酸酐酶负载质量对微藻固碳性能的影响规律

在完成了碳酸酐酶附着的尼龙纤维膜的微藻培养实验后,进一步通过对照组方案4~7研究碳酸酐酶负载质量和透光量对微藻生长固碳的影响规律,得到了如图7所示的微藻生长曲线。从图7中可以看出,开孔后微藻生长速率呈现下降的趋势,这是由于附着在膜表面的碳酸酐酶负载质量下降导致的。可见,相比于开孔率提升导致的透光率提升,碳酸酐酶的负载质量对微藻生长速率和固碳率更为关键。由于漂浮的尼龙纤维膜并未完全覆盖光生物反应器的表面,膜上开孔带来的光照强度增加并没有起到增加微藻生长速率和固碳率的作用,但碳酸酐酶的高负载质量能更有效地促进微藻的光合作用和生长。该实验结果也表明,在低浓度 CO_2 供给的条件下,微藻对光照的需求不敏感,更高的碳酸酐酶负载质量可以提高微藻溶液内的碳酸氢根的质量浓度,提高了微藻的固碳率。

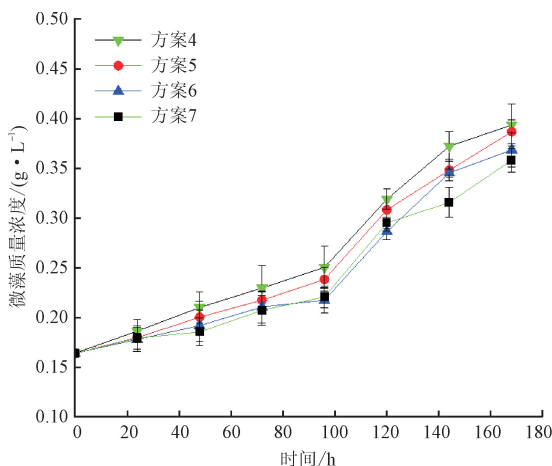


图7 方案4~7时微藻质量浓度随时间的变化

Fig. 7 Microalgae biomass growth curve with time (schemes 4—7)

由于采用层堆积法对CA进行了多层附着,因此CA在尼龙纤维膜上呈均匀分布,通过增加膜表面的开孔实际也减少了CA的附着量。采用CA负载质量与固碳质量的比值来评估CA的效率(η_{CA})。CA效率的计算方法如下式

$$\eta_{\text{CA}} = \frac{R_{\text{C}}}{L_{\text{CA}}} \quad (5)$$

式中: R_{C} 是由式(4)计算得到的微藻碳捕获量; L_{CA} 表示CA的相对负载质量,假设方案4中无开孔的CA相对负载质量是1,方案5~7中的CA相对负载质量则依次递减。不同碳酸酐酶负载质量的微藻固碳率如图8所示。

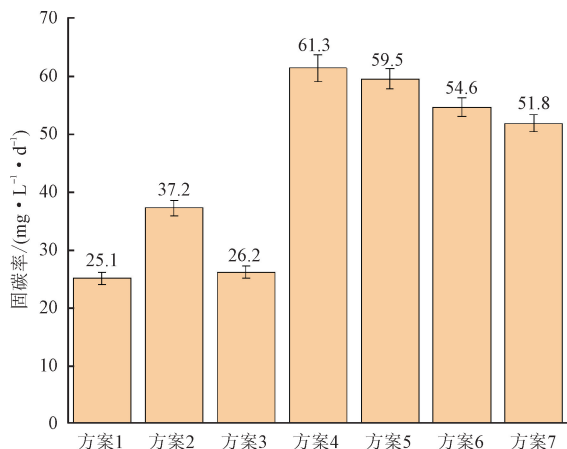


图8 不同对照组微藻的固碳率(方案1~7)

Fig. 8 Microalgae carbon capture rate of different controlled groups (schemes 1—7)

按照此方法计算,0%、7.5%、15.75%和24.75%开孔的CA尼龙膜对应的效率 η_{CA} 分别为0.613、0.643、0.648和0.689。从这些结果可以看出,随着开孔率的增加,CA的效率 η_{CA} 也在增加。这意味着即使CA的绝对负载质量减少,单位CA负载质量的固碳率却在提高。这也从另一个方面说明了膜表面开孔获得了更多的光照进入,促进了光合作用。但同时需要注意的是,这种效率的提高并没有直接导致微藻的总固碳质量增加。事实上,总固碳质量随着开孔率的增加而减少,这表明尽管CA使用效率提高了,但由于CA总负载质量的减少,微藻光生物反应系统的固碳能力受到了限制。

3 结论

本文揭示了碳酸酐酶附着尼龙纤维膜在光生物反应器中对提升微藻固碳率的影响。开展了7组对照实验,实验结果表明,CA尼龙膜有效提高了微藻

的生长速率和固碳率,尤其是在调整膜的开孔率后,单位 CA 负载质量的固碳率得到提升,主要结论如下。

(1)碳酸酐酶可以有效提升 CO_2 转化为碳酸氢根的效率,附着 CA 的尼龙纤维膜转化能力提升了 62.7%,耐久性在浸泡 5 d 后仅下降了 11.3%。

(2)相较于传统气石鼓气法,CA 尼龙膜能够显著提升微藻的固碳率,微藻生长速率提高了 29.7%,固碳率提高了 65%,为微藻培养提供了一种高效的 CO_2 捕集途径。

(3)随着开孔率的增加,虽然 CA 的绝对负载质量减少,但由于透光面基增大,单位 CA 负载质量的固碳率提高,相比不开孔的对照组,开孔率 24.75% 的对照组的单位 CA 固碳率提高了 13%。

综上所述,本文不仅展示了 CA 附着尼龙膜在提升微藻固碳率方面的潜力,也为未来光生物反应器设计和操作提供了重要的参考。

参考文献:

- [1] HUANG Dong, LI Mingjia, WANG Ruilong, et al. Advanced carbon sequestration by the hybrid system of photobioreactor and microbial fuel cell with novel photocatalytic porous framework [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 333: 125182.
- [2] WILBERFORCE T, OLABI A G, SAYED E T, et al. Progress in carbon capture technologies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143203.
- [3] HO S H, CHEN C Y, LEE D J, et al. Perspectives on microalgal CO_2 -emission mitigation systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2011, 29(2): 189-198.
- [4] LI Mingjia, WANG Ruilong, YANG Yiwen, et al. Numerical and experimental analysis of optimized conical flask photobioreactor structures to improve liquid-gas two-phase distribution and microalgae carbon sequestration [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 180: 115855.
- [5] 宋秉烨,李明佳,童自翔,等. 碱性阴离子交换膜燃料电池用于消除微藻固碳过程中溶氧效应的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(8): 27-34.
SONG Bingye, LI Mingjia, TONG Zixiang, et al. An experimental study on the dissolved oxygen consumption with alkaline anion-exchange membrane fuel cell [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(8): 27-34.
- [6] LEGRAND J, ARTU A, PRUVOST J. A review on

- photobioreactor design and modelling for microalgae production [J]. *Reaction Chemistry & Engineering*, 2021, 6(7): 1134-1151.
- [7] ZHUANG Linlan, YU Dawei, ZHANG Jian, et al. The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 1110-1119.
 - [8] YONG J K J, STEVENS G W, CARUSO F, et al. In situ layer-by-layer assembled carbonic anhydrase-coated hollow fiber membrane contactor for rapid CO_2 absorption [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 514: 556-565.
 - [9] YANG Yiwen, LI Mingjia, TAO Wenquan, et al. Study of carbon dioxide sequestration and electricity generation by a new hybrid bioenergy system with the novelty catalyst [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 197: 117366.
 - [10] 周文广,阮榕生. 微藻生物固碳技术进展和发展趋势 [J]. *中国科学(化学)*, 2014, 44(1): 63-78.
ZHOU Wenguang, RUAN Rongsheng. Biological mitigation of carbon dioxide via microalgae: recent development and future direction [J]. *Scientia Sinica(Chimica)*, 2014, 44(1): 63-78.
 - [11] LI Mingjia, TONG Zixiang, ZHOU Zhijie, et al. A numerical model coupling bubble flow, light transfer, cell motion and growth kinetics for real timescale microalgae cultivation and its applications in flat plate photobioreactors [J]. *Algal Research*, 2019, 44: 101727.
 - [12] WANG Ruilong, LI Mingjia, LI Dong, et al. The synergy of light/fluid flow and membrane modification of a novel membrane microalgal photobioreactor for direct air carbon capture [J]. *Applied Energy*, 2022, 328: 120133.
 - [13] MORAES L, DA ROSA G M, SANTOS L O, et al. Innovative development of membrane sparger for carbon dioxide supply in microalgae cultures [J]. *Biotechnology Progress*, 2020, 36(4): e2987.
 - [14] LIM Y A, ILANKOON I M S K, CHONG Mengnan, et al. Improving microalgae growth and carbon capture through micro-size bubbles generation in flat-panel photobioreactors: Impacts of different gas sparger designs on mixing performance [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 171: 113001.
 - [15] RAHAMAN M S A, CHENG Lihua, XU Xinhua, et al. A review of carbon dioxide capture and utilization by membrane integrated microalgal cultivation proces-

- ses [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8): 4002-4012.
- [16] FAN Lihai, ZHANG Yatao, ZHANG Lin, et al. Evaluation of a membrane-sparged helical tubular photobioreactor for carbon dioxide biofixation by *Chlorella vulgaris* [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 325(1): 336-345.
- [17] MCQUEEN N, GOMES K V, MCCORMICK C, et al. A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future [J]. *Progress in Energy*, 2021, 3(3): 032001.
- [18] MOLINA-FERNÁNDEZ C, LUIS P. Immobilization of carbonic anhydrase for CO₂ capture and its industrial implementation: a review [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 47: 101475.
- [19] MENDOZA J L, GRANADOS M R, DE GODOS I, et al. Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 54: 267-275.
- [20] JUN S H, YANG J, JEON H, et al. Stabilized and immobilized carbonic anhydrase on electrospun nanofibers for enzymatic CO₂ conversion and utilization in expedited microalgal growth [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(2): 1223-1231.
- [21] FU Yaqin, JIANG Yingbing, DUNPHY D, et al. Ultra-thin enzymatic liquid membrane for CO₂ separation and capture [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 990.
- [22] XU Xiaoyin, KENTISH S E, MARTIN G J O. Direct air capture of CO₂ by microalgae with buoyant beads encapsulating carbonic anhydrase [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(29): 9698-9706.
- [23] JUN S H, YANG J, JEON H, et al. Stabilized and immobilized carbonic anhydrase on electrospun nanofibers for enzymatic CO₂ conversion and utilization in expedited microalgal growth [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(2): 1223-1231.
- [24] YONG J K J, CUI Jiwei, CHO K L, et al. Surface engineering of polypropylene membranes with carbonic anhydrase-loaded mesoporous silica nanoparticles for improved carbon dioxide hydration [J]. *Langmuir*, 2015, 31(22): 6211-6219.
- [25] YONG J K J, STEVENS G W, CARUSO F, et al. The resilience of carbonic anhydrase enzyme for membrane-based carbon capture applications [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 62: 122-129.
- [26] XU X. Enhancement of CO₂ capture and utilization by microalgae [D]. Parkville, Australia: The University of Melbourne, 2021.

(编辑 武红江)