

小球藻碳汇生产条件研究

徐雪宁, 孙东红*, 崔坤淼, 李容兆, 彭静静, 李晓光, 邹宁, 司书舟, 王亚琳
鲁东大学生命科学学院, 山东 烟台

收稿日期: 2023年4月26日; 录用日期: 2023年6月29日; 发布日期: 2023年7月6日

摘要

本文通过测定小球藻光合作用吸收CO₂的量对微藻碳中和和碳汇生产条件进行了研究。实验结果表明, 在上午8:30~10:00, 小球藻吸收CO₂速率最快, 细胞密度为 1.69×10^7 的小球藻吸收CO₂速率最高可达 1.928×10^{-8} mg/个·min⁻¹、325 mg/L·min⁻¹、6.565 g/m²·min⁻¹。结果表明, 小球藻具有极高的CO₂吸收能力, 这对于削减CO₂的排放具有极为重要的意义。

关键词

小球藻, CO₂减排, 培养条件

Research on Conditions of Absorption of Carbon Dioxide by *Chlorella* spp.

Xuening Xu, Donghong Sun*, Kunmiao Cui, Rongzhao Li, Jingjing Peng, Xiaoguang Li, Ning Zou, Shuzhou Si, Yalin Wang

College of Life Science, Ludong University, Yantai Shandong

Received: Apr. 26th, 2023; accepted: Jun. 29th, 2023; published: Jul. 6th, 2023

Abstract

The production conditions of microalgae carbon neutrality and carbon sink were studied by measuring the amount of CO₂ absorbed by *Chlorella* spp. photosynthesis in this paper. The experimental results showed that *Chlorella* spp. had the fastest CO₂ absorption rate from 8:30 to 10:00 am, with a cell density of 1.69×10^7 . *Chlorella* spp. can absorb CO₂ at a maximum rate of 1.928×10^{-8} mg/piece·min⁻¹, 325 mg/L·min⁻¹ and 6.565 g/m²·min⁻¹. The results show that *Chlorella* spp. has an extremely high CO₂ absorption capacity, which is of great significance for reducing CO₂ emissions.

*通讯作者。

文章引用: 徐雪宁, 孙东红, 崔坤淼, 李容兆, 彭静静, 李晓光, 邹宁, 司书舟, 王亚琳. 小球藻碳汇生产条件研究[J]. 自然科学, 2023, 11(4): 555-563. DOI: 10.12677/ojns.2023.114066

Keywords

Chlorella spp., CO₂ Emission Reduction, Cultivation Conditions

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

旨在限制全球温室气体排放量的《京都议定书》于1997年12月在日本京都达成协议，2005年2月16日开始正式生效，这标志着人类为防止全球变暖迈出了实质性的一步。随着经济的快速发展对能源生产和消耗需求的增长，我国的CO₂排放总量在21世纪可能达到很高的水平，面临的CO₂减排压力的形势十分严峻。政府出台各项政策以促进CO₂减排[1]。例如，根据清洁发展机制下的造林再造林碳汇项目相关规定，大力促进造林再造林项目；促进CO₂的回收利用；科技部将进一步加强与亚洲、非洲国家在可再生能源与新能源领域的国际交流合作；国务院批准国家海洋局新增节能减排和应对气候变化等重要职能。

党的二十大报告提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和”，“碳达峰碳中和既是我国当前社会关注的热点，也是我国未来社会发展的主要战略，需要长期坚持，持续努力，久久为功才能实现”，“碳达峰碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革”。碳达峰碳中和的部署，在我国建设生态文明、推动社会可持续发展方面起到了“举旗定向”的作用。党的二十大报告提出就是对这一问题复杂性和长期性的深刻揭示，反映了党中央对实施这一重大战略所面临问题的清晰判断。

积极参与应对气候变化全球治理。秉持人类命运共同体理念，积极参与国际气候谈判和规则制定，推动构建公平合理、合作共赢的全球环境治理体系。统筹做好应对气候变化国际斗争合作，坚持我国发展中国家定位，坚持共同但有区别责任原则、公平原则和各自能力原则，坚决维护我国发展权益。积极开展绿色低碳领域务实合作和技术交流，参与碳定价机制和绿色金融标准体系国际宏观协调。深化绿色“一带一路”建设，提高境外项目环境可持续性，支持发展中国家能源绿色低碳发展。

当前，我国正在深入推动能源革命，有序推进碳达峰碳中和，能源生产和消费稳步向清洁低碳、安全高效转变。张建红认为，实现碳达峰碳中和目标，关键是能源体系的绿色低碳转型。由于新能源“看天吃饭”的固有特性，而我国又是煤炭大国，在推行能源革命时，必须先立后破，能源的饭碗必须端在自己手里，要立足能源结构以煤为主的基本国情，大力推动煤炭清洁利用，保证能源安全 and 经济平稳运行[2]。

全球气候治理不仅是人类社会共同应对全球变化的重要问题，还是人类历史发展和科技进步的文明成果。从关注人类生存与社会经济发展的人类生态学视角来看，可以将全球碳达峰、碳中和(以下简称“双碳”)行动的意义概括为：① 是对人类种群及社会发展模式的自我修正，也是对地球生物圈演变过程的有序人为干预；② 是人类社会协同重构全球环境治理体系，重塑自然与生命共同体的实践探索；③ 是人类社会携手管控地球系统物质循环模式及过程所实施的地球生态重大工程。这需要科技界从应对全球变化的视角尺度，深入理解地球生物圈自然演替规律与人类可持续发展的关系，探讨人类社会有序重塑自然与人类命运共同体的理论和技术途径，设计人类社会协同调节全球生态环境的系统工程方案。

实现“双碳”目标，是以习近平同志为核心的党中央统筹国内国际两个大局作出的重大战略决策。正确认识我国“双碳”战略的科学、经济和社会意义，对顺利实现“双碳”目标、科学制定“双碳”行

动方略具有全局性、方向性、策略性的指导作用。“双碳”行动的重要战略意义主要体现在：① 是中国应对世界百年未有之大变局，实现未来 50 年社会变革、科技发展及民族振兴的宏伟举措；② 是中国参与全球治理的政治承诺，落实《巴黎协定》温控目标的自主行动；③ 是改变社会经济发展模式，从根本上遏制生态环境恶化，促进“减污-脱碳”科技进步，催生新型脱碳经济的倒逼机制；④ 是驱动中国生态文明建设，治理国土空间环境，建设富饶、美丽和健康的现代化强国发展目标的新引擎[3]。

在一系列气候公约国际谈判中，国际社会对森林吸收二氧化碳的汇聚作用越来越重视。《波恩政治协议》《马拉喀什协定》将造林、再造林等活动纳入《京都议定书》确立的清洁发展机制，鼓励各国通过绿化、造林来抵消一部分工业源二氧化碳的排放，原则同意将造林、再造林作为第一承诺期合格的清洁发展机制项目，意味着发达国家可以通过在发展中国家实施林业碳汇项目抵消其部分温室气体排放量[4]。

碳汇一般是指从空气中清除二氧化碳的过程、活动、机制。目前，森林碳汇是碳汇最主要的方面。森林[5]是陆地生态系统中最大的碳库，在降低大气中温室气体浓度、减缓全球气候变暖中，具有十分重要的独特作用[6]。森林碳汇是指森林植物吸收大气中的二氧化碳并将其固定在植被或土壤中，从而减少大气中二氧化碳浓度的过程[7]。国内对森林碳储量研究主要以新中国建国以来的碳储量和碳汇计量研究为重点。森林具有碳汇和碳源双重功能，其功能的发挥方向和作用结果的大小，取决于人类对森林的经营管理水平。因此，如何估算和预测中国森林资源碳储量，充分发挥森林碳汇价值，提高森林经营管理水平，实现碳达峰碳中和的战略目标，完成我国林业发展预期任务是一项重要工程，值得深入研究[8]。

《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》明确了各行业需要统筹布局、山水林田湖草综合治理的工作原则，还设定了各时期的阶段工作目标，如我国森林覆盖率 2025 年和 2030 年分别达到 24.1% 和 25% 左右。我国前期的多项工作都为提升碳汇功能的全国统一布局打下了良好基础。同时，以往的重大生态工程也为区域碳汇能力增强提供了保障，包括“三北”防护林、南方红黄壤恢复区等都已经发挥了巨大的增汇作用。近期我国推出的长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”战略、黄河流域生态保护和高质量发展战略都是以各地生态保护为前提的，而生态大保护也为进一步巩固和提升生态系统碳汇功能带来了契机[9]。

《京都议定书》为国际碳汇交易和造林再造林项目的发展提供了国际法的保障[10]。根据规定，发达国家通过向发展中国家提供资金和技术，开展造林、再造林碳汇项目，将项目产生的碳汇额度用于抵消其国内的减排指标。例如，我国东北部内蒙古敖汉旗防治荒漠化青年造林项目就是由外方承担部分投入在我国造林的第一个碳汇造林项目。项目的第一个有效期 5 年时间内投资 153 万美元，在敖汉旗荒沙地造林 3000 公顷。作为二氧化碳排放大国，中国是《联合国气候变化框架公约》的首批缔约国，并于 1998 年 5 月签署《京都议定书》，于 2002 年 8 月核准了该议定书，2009 年我国首次提出具体温室气体减排目标，2020 年习近平主席在第七十五届联合国大会上首次提出“双碳”目标，即“中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”[11]。

除森林碳汇，其他减排途径也具有重要的作用。例如，加大对可再生能源和新能源的研究和开发利用；其他生态系统(如草地、农田等)碳汇等。利用藻类，特别是微藻光合作用吸收 CO_2 以达到削减 CO_2 排放的目的在国内外的研究中尚属空白。众所周知，海洋微藻[12]是海洋生态系统中主要的生产者，繁殖快，在海洋生态系统的物质循环和能量流动中具有极其重要的作用。海洋碳循环是全球碳循环的重要组成部分，影响着大气中 CO_2 的收支平衡。而海洋微藻光合作用吸收 CO_2 则是海洋生态系统中吸收 CO_2 能力的重要组成[13]。因此，微藻碳汇[14]的研究对于海洋碳循环的研究具有极为重要的理论意义。

微藻，能天然利用太阳能固定 CO_2 或者利用有机碳实现生长，实现“减污降碳”。从全生命周期来看，只要微藻藻体最终被利用，碳仍然会回到环境中，因此其利用的碳是中性碳，具有碳中和“零碳”的特征属性。不同于其他自然固碳过程，如植树造林，微藻由于其生长周期短，理论光合效率更高，更

方便进行人工调控,而且由于其为单细胞生物,其组成都是可以利用甚至是高值化利用的成分,因此具有重要的价值,可以调和双碳目标实现与满足人们日益增长的需求之间的矛盾[15]。微藻生产具有不占用耕地、生长周期短、光合效率高等特点,受到排碳大户们的广泛关注。将微藻生产技术与火电厂、钢铁厂、化工厂和食品发酵厂等不同行业的结合,不仅可减排二氧化碳,而且生产得到的微藻生物质可用于饲料、食品、化工产品和能源。中国二氧化碳捕集利用与封存 2021 年报告中指出,生物固碳与捕集等负排放技术是实现碳中和目标的重要技术保障[16]。

小球藻作为第一种人工培养的单细胞藻类,近十年来,国内外研究结果表明,普通小球藻在不同 CO₂ 浓度条件脱碳效果较好,并表现出高 CO₂ 耐性,因此,小球藻是一种研究高浓度 CO₂ 环境下微藻固碳效应良好的模式生物[17],小球藻是现在能够进行大规模培养的经济微藻之一。小球藻可适应复杂的生态环境,抗侵染能力强,在自然界中普遍存在,适合大规模粗放式培养,常被应用于处理污水中[18]。由于其极高的营养及药用价值,所以具有很高的经济价值。同时,小球藻能够利用废水中的氮、磷等无机污染物,能够吸收和富集重金属离子,能够降解废水中的有机物,所以在环境污染治理中也具有很高的利用价值。

小球藻固定 CO₂ 速率可分为两个过程,即物理固碳过程和生物固碳过程,前者在藻细胞延滞期发生,峰值由 CO₂ 溶解于培养液造成,后者在藻细胞生长的指数期、稳定期和衰退期发生,峰值由藻细胞指数生长造成,两个过程中,固定 CO₂ 速率的变化趋势都是先增大后降低;纯 CO₂ 条件下,藻液 pH 值变化速率高,4 d 内,藻液即被酸化,随后藻液 pH 值变化速率逐渐降低,且 pH 值稳定在适宜水平[19]。普通小球藻在不同 CO₂ 浓度条件脱碳效果较好,并表现出高 CO₂ 耐性,因此,小球藻是一种研究高浓度 CO₂ 环境下微藻固碳效应良好的模式生物。

小球藻作为一种微藻,具有极高的光合作用效率。单个藻细胞通过光合作用吸收 CO₂ 的能力是其他高等植物不能相比的。小球藻碳汇的研究又将为小球藻在清洁发展机制下的利用提供更为广阔的前景。本文对小球藻通过光合作用吸收 CO₂ 削减 CO₂ 排放的能力进行了研究。

2050 年能源科学发展战略已明确将微藻固碳和能源利用作为中国的潜在发展方向,但利用微藻对 CO₂ 进行捕获仍面临一些挑战[19]。我们从影响小球藻光合作用效率的时间变化为出发点,介绍了小球藻一天当中的不同时间下光合固碳速率的不同,探求小球藻的光合固碳规律,回顾小球藻固碳的研究现状并探讨了其研究制约因素,总结出了小球藻光合效率最佳利用时间的策略,最后,对未来小球藻固碳领域的发展进行展望。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

小球藻:小球藻(*Chlorella* spp.)藻种由鲁东大学经济海藻种质库提供。采用新式光生物反应器对小球藻进行扩大培养,培养密度达到 1.69×10^7 个/mL 时,进行实验。

2.2. 仪器

CB-1101 型光合蒸腾作用测定系统:思爱迪(北京)生态科学仪器公司;

XS-200 型光学显微镜:Olympus Corporation。

2.3. 实验方法

小球藻培养液采用改良的 SE 液体培养基,通过添加少量 NaOH 或 HCl 调节灭菌后的各个处理液 pH 值都稳定在 8.0 ± 0.1 。培养条件如下:光照强度 $200 \text{ umol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光照 12 h,温度保持在 $22.0 \pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$;夜间 12 h,温度保持 $18.0 \pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 。各个实验处理同时同批次平行培养 6 瓶,培养周期为 5 d。且在实验

处理过程中,不断随机调换位置,以消除培养室局部的温度、光照差异对小球藻生长的影响。

在一天中的 8:00~10:00、11:00~13:00、14:00~16:00、17:00~19:00 四个时间段进行实验。

光合蒸腾作用测定系统接通电源预热 20 分钟,用广口瓶作为小球藻光合作用系统。实验组广口瓶中装入 2/3 体积的小球藻液,气泵泵入空气,瓶中排出气体连接到光合蒸腾作用测定系统,测定排出气体中 CO_2 的含量。同时,测定光照强度和小球藻液的温度。间隔 5 分钟读取数据一次,并记录。对照组广口瓶中装入等量的自来水泵入空气,测定排出气体中 CO_2 的含量。

通过比较实验组 CO_2 的含量和对照组 CO_2 的含量,确定四个实验时间段中小球藻吸收 CO_2 的量,进而计算出,在小球藻培养密度为 1.69×10^7 个/mL 时,每个藻细胞单位时间吸收 CO_2 的量($\text{mg}/\text{个} \cdot \text{min}^{-1}$)、每升藻液单位时间吸收 CO_2 的量($\text{mg}/\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)、单位面积藻液单位时间吸收 CO_2 的量($\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)。

2.4. 主要影响因素分析

2.4.1. 光照

光照是影响小球藻生长的最重要的环境因子之一。光照对小球藻的生长、繁殖、藻体颜色、细胞形态及胞外多糖积聚都有重要影响。自然界中光照的变化具有一定的规律性和稳定性,在小球藻的长期进化过程中,光照对它们的影响使它们对光照的反应具有特异性,小球藻有最适于其生长的最佳光照环境。在小球藻培养中,研究光照的作用,应用适当的光照技术加快培养对象的生长繁殖,调节其营养成分,是提高产量和质量的重要途径。光照作为一个复杂的生态因子,作用因素包括光照强度、光照周期和光谱。

2.4.2. 二氧化碳浓度

光合作用碳代谢可以说是地球上最重要的生化过程,它几乎是所有生命体赖以生存和生长的方式,并且也是全球碳循环的一个重要部分。这个过程的中心碳代谢途径是卡尔文循环(Calvin-Benson-Bassham Cycle, CBB),通过一系列反应,外界环境的无机碳被转化为生命体能利用的有机碳,太阳能被存储在大分子的碳水化合物中。小球藻通过光合作用将空气中的 CO_2 或者可溶性的碳酸盐以碳水化合物的形式固定到细胞内形成蛋白质和脂质。

3. 实验结果

3.1. 日间光照强度变化

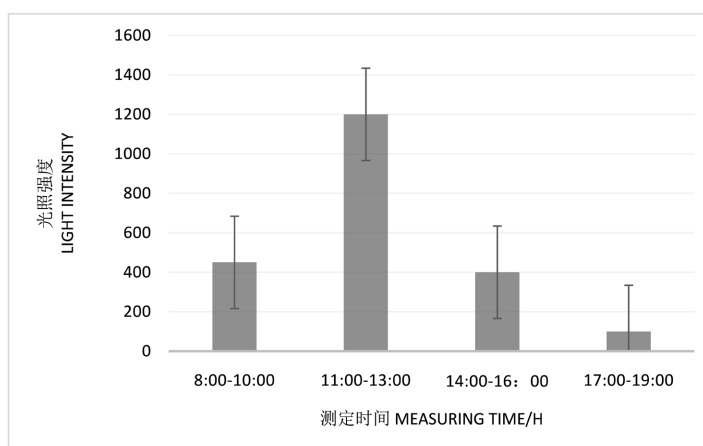


Figure 1. Determination of daytime light intensity

图 1. 日间光照强度测定

由图 1 日间光照强度的变化得出, 上午 8:00~10:00 光照强度较强, 11:00~13:00 光照强度增强, 此区间内日间光照强度达到峰值, 在 16:00 以后, 随着光强度减弱。

3.2. 日间温度变化

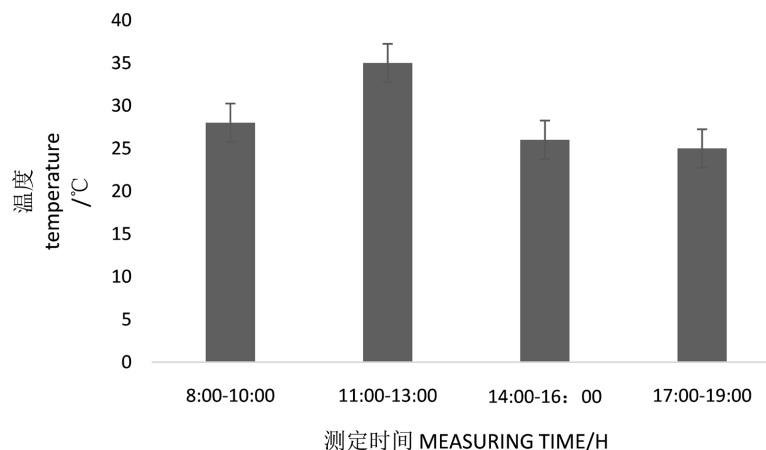


Figure 2. Determination of daytime temperature

图 2. 日间温度测定

由图 2 可看出, 上午 8:00~10:00 温度较高, 光合作用也较强; 中午 11:00~13:00 温度达到峰值, 光合作用进一步增强, 光合效率反而有所下降, 可能是由于温度太高, 超过了小球藻的最适生长温度和光合作用温度, 同时伴随光照过强超过了光饱和点并加快了光氧化和光呼吸作用所致; 在 16:00 以后, 温度减弱, 光合作用减弱。因此, 我们需要在适宜的温度范围内培养小球藻。

3.3. 培养液中日间 CO₂ 含量变化

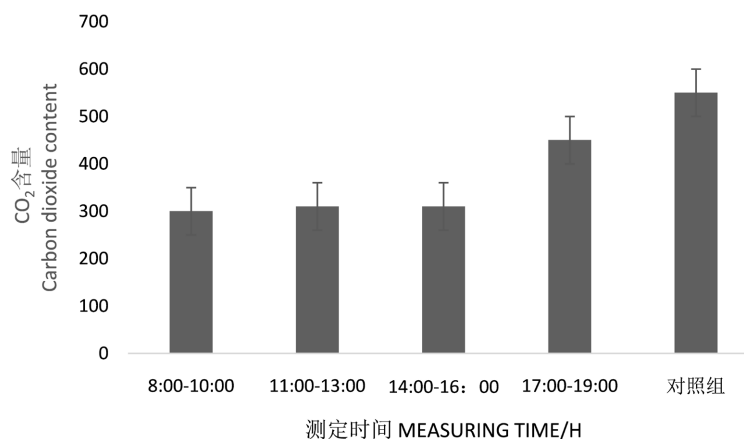


Figure 3. Daytime CO₂ content changes were determined by the photosynthetic determination system

图 3. 日间由光合测定系统 CO₂ 含量变化

由图 3 可看出, 上午 8:00~10:00 之间通过系统测定的 CO₂ 量最少, 这表明在这段时间内通入藻液中的 CO₂ 有很大一部分被小球藻进行光合作用吸收, 而在 11:00 以后, 培养液中的 CO₂ 含量略微增多, 这可能是由于随光照增强, 小球藻呼吸作用加强, 净光合速率减慢, 在 16:00 以后, 随着光强度减弱, CO₂ 含量逐渐增加, 说明小球藻吸收 CO₂ 量减少, 光合作用减弱。

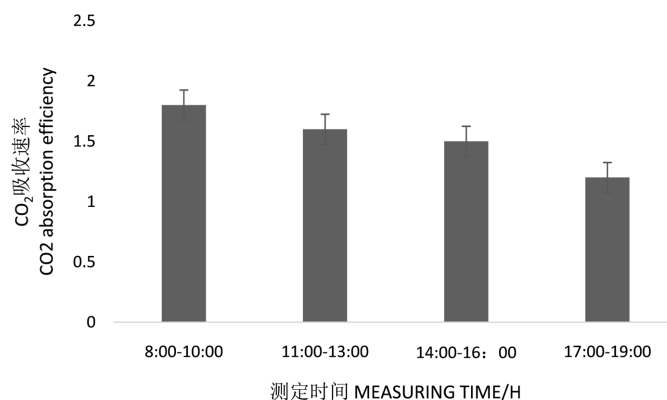


Figure 4. Rate of CO₂ absorption by each algal cell

图 4. 每个藻细胞吸收 CO₂ 速率

由图 4 可看出, 每个小球藻在上午 8:00~10:00 吸收 CO₂ 速率最快, 在 10:00 之后小球藻吸收 CO₂ 速率逐渐下降。根据日间时间变化, 每个小球藻吸收 CO₂ 速率逐级递减。

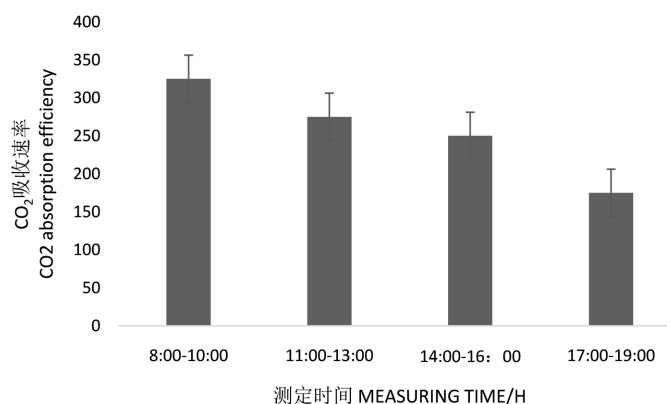


Figure 5. Rate of CO₂ absorption per liter of algal fluid

图 5. 每升藻液吸收 CO₂ 速率

由图 5 看出, 每升藻液在上午 8:00~10:00 吸收 CO₂ 速率最快, 在 10:00 之后每升藻液吸收 CO₂ 速率逐渐下降, 在 11:00~16:00 区间吸收 CO₂ 速率变化小。根据日间时间变化, 每升藻液吸收 CO₂ 速率逐级递减。

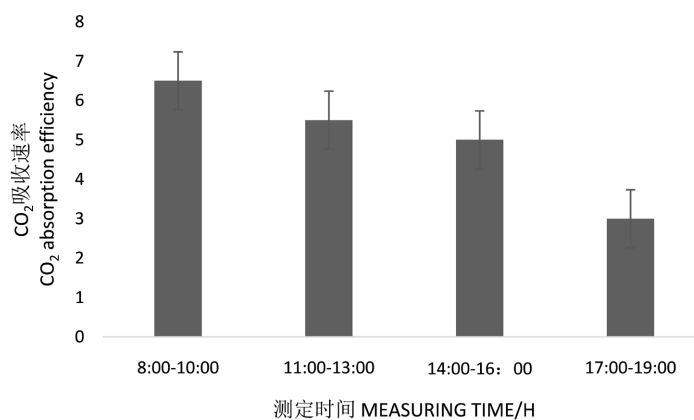


Figure 6. Rate of CO₂ absorption of algal solution per square meter per unit area

图 6. 每平方米单位面积藻液吸收 CO₂ 速率

由图6可以看出,小球藻在上午8:00~10:00吸收CO₂速率最快,细胞密度为 1.69×10^7 的小球藻吸收CO₂速率最高可达 $1.928 \times 10^{-8} \text{ mg/个}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $325 \text{ mg/L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $6.565 \text{ g/m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ 。然而,在以往的研究中,小球藻所能达到的最高固碳速率为 $133.2 \text{ mg/L}\cdot\text{min}^{-1}$ [20],斜栅藻所能达到的最高固碳速率为 $93 \text{ mg/L}\cdot\text{min}^{-1}$ [21],螺旋藻所能达到的最高固碳速率为 $27.72 \text{ mg/L}\cdot\text{min}^{-1}$ [22],这些都远低于我们小球藻的CO₂固定效率,由此可见,小球藻的高吸收速率是其他微藻所无法比拟的。在10:00之后,小球藻吸收CO₂速率逐渐下降。每平方米单位面积藻液吸收CO₂效率也逐渐下降,光照会对小球藻的固碳速率产生不利的影响。

由结果可以看出,小球藻具有极高的CO₂吸收能力,小球藻作为一种微藻,具有极高的光合作用效率,单个藻细胞通过光合作用吸收CO₂的能力是其他高等植物不能相比的。这对于削减CO₂的排放具有极为重要的意义。碳汇交易同样对小球藻等微藻的研究及产业化带来了机遇。

3.4. 结论小结

本实验通过测定小球藻光合作用吸收二氧化碳的量对微藻碳汇生产条件进行研究,通过测定不同时间段的光照强度,发现光合作用强度不同,表明在上午8:30~10:00小球藻吸收CO₂速率最快,细胞密度为 1.69×10^7 的小球藻吸收CO₂速率最高可达 $1.928 \times 10^{-8} \text{ mg/个}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $325 \text{ mg/L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $6.565 \text{ g/m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ 。结果可以看出,小球藻具有极高的CO₂吸收能力,这对于削减CO₂的排放,促进中国的碳达峰、碳中和事业,实现微藻不“微”具有极为重要的意义。

参考文献

- [1] 梅西,刘锐. 大气中CO₂含量的控制因素及其对气候的影响[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(9): 1-7.
- [2] 郭锦辉. 党的二十大报告为碳达峰碳中和“举旗定向” [N]. 中国经济时报, 2022-10-21(001).
- [3] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.
- [4] 曲建升,孙成权,张志强,等. 全球变化科学中碳循环研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 980-986.
- [5] 宛志沪,王相文. 森林对二氧化碳循环的影响[J]. 安徽农业大学学报, 1997, 24(1): 8-13.
- [6] 王华章,刘文祥. 谈碳汇造林项目[J]. 林业勘查设计, 2008(3): 10-11.
- [7] 顾凯平,张坤,张丽霞. 森林碳汇计量方法的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(5): 105-109.
- [8] 张颖,李晓格,温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38-47.
- [9] 于贵瑞,朱剑兴,徐丽,何念鹏. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 490-501.
- [10] 许文强,支玲. 涉及国际碳汇贸易的林业项目碳汇价值的确定——基于森林碳汇经济学特性的分析[J]. 林业经济问题, 2008, 28(5): 401-404. <https://doi.org/10.16832/j.cnki.1005-9709.2008.05.005>
- [11] 曾予映,廖芬. 碳中和背景下微藻的应用价值[J]. 绿色科技, 2022, 24(12): 228-231+235.
- [12] 倪学文. 海洋微藻应用研究现状与展望[J]. 海洋渔业, 2005, 27(3): 251-255.
- [13] 殷建平,王友绍,徐继荣,等. 海洋碳循环研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 566-575.
- [14] 刘允芬. 中国农业系统碳汇功能[J]. 农业环境保护, 1998, 17(5): 197-202.
- [15] 章真,刘晓军,陈夏,姚丽萍,张荣庆. 微藻生物技术在碳中和的应用与展望[J]. 中国生物工程杂志, 2022, 42(1): 160-173.
- [16] 龙菲平,迟庆雷. 微藻生物固碳技术研究和应用情况[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(4): 126-129.
- [17] 宋成军,董保成,赵立欣,陈羚,罗娟,万小春,张玉华,张旭东. 纯二氧化碳条件下小球藻固定CO₂ [J]. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4566-4572.
- [18] 郭亚敏. 利用小球藻净化村镇生活污水的预处理研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.

-
- [19] 中华人民共和国中央人民政府. 中科院能源报告提出 2050 年我国能源发展战略目标[EB/OL]. 新华社. https://www.gov.cn/jrzq/2007-10/22/content_783428.htm, 2007-10-22.
- [20] Anjos, M., Fernandes, B.D., Vicente, A.A., *et al.* (2013) Optimization of CO₂ Bio-Mitigation by *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, **139**, 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.032>
- [21] Tang, D., Han, W., Li, P., *et al.* (2011) CO₂ Biofixation and Fatty Acid Composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in Response to Different CO₂ Levels. *Bioresource Technology*, **102**, 3071-3076. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.047>
- [22] Zhu, B., Xiao, T., Shen, H., *et al.* (2021) Effects of CO₂ Concentration on Carbon Fixation Capability and Production of Valuable Substances by *Spirulina* in a Columnar Photobioreactor. *Algal Research*, **56**, Article ID: 102310. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102310>