

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.010

# 基于生物固碳技术的 CO<sub>2</sub> 资源化利用研究进展

Research progress of CO<sub>2</sub> resource utilization based on biological carbon sequestration technology

胡小夫, 王凯亮, 沈建永, 白永锋

HU Xiaofu, WANG Kailiang, SHEN Jianyong, BAI Yongfeng

(中国华电科工集团有限公司, 北京 100070)

(China Huadian Engineering Corporation Limited, Beijing 100070, China)

**摘要:** 温室气体 CO<sub>2</sub> 积累而导致的全球性气候变化引起了人们的广泛重视, 目前全球已有超过 120 个国家和地区提出了碳中和目标。生物固碳技术因具有反应条件温和、产品多样性等优点, 使其在 CO<sub>2</sub> 资源化利用方面表现出优异的应用前景。分别对光合作用固碳原理和微生物电化学固碳原理进行了阐述, 主要介绍了光合作用固碳资源化利用方式, 如微藻固碳制甲烷、微藻固碳制生物燃料、微藻处理废水等, 以及其他生物固碳及资源化利用方式, 并对未来基于生物固碳技术的 CO<sub>2</sub> 资源化利用技术的重点研究方向进行了展望。

**关键词:** 生物固碳; 二氧化碳资源化; 温室气体; 生物转化; 低碳经济; 碳中和; 碳达峰

中图分类号: TK 6

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2021)06-0079-07

**Abstract:** Global climate change caused by the accumulation of greenhouse gases has attracted extensive attention. Nowadays, more than 120 nations and regions have proposed the carbon neutrality targets. Biological carbon sequestration technology shows excellent application prospects in CO<sub>2</sub> resource utilization because of its mild reaction conditions and product diversity. The principles of photosynthetic carbon fixation and microbial electrochemical carbon fixation were described respectively, and the resource utilization methods of photosynthetic carbon fixation were mainly introduced, such as microalgae carbon fixation to methane, microalgae carbon fixation to biofuel, microalgae wastewater treatment, and other biological carbon fixation and resource utilization methods, The key research directions of CO<sub>2</sub> resource utilization technology based on biological carbon sequestration technology in the future are prospected.

**Keywords:** biological carbon sequestration; CO<sub>2</sub> utilization; greenhouse gases; biotransformation; low-carbon economy; carbon neutrality; carbon peak

## 0 引言

随着全球气候变暖引起人们的广泛重视, 目前全球已有超过 120 个国家和地区提出了碳中和目标, “低碳经济”发展将进入快车道。因 CO<sub>2</sub> 对“温室效应”的贡献率约占所有温室气体的 60%, 促使人们寻找更有效和可持续的 CO<sub>2</sub> 固定及资源化利用技术。目前最常见的 CO<sub>2</sub> 固定技术包括物理封存固碳技术、化学固碳技术和生物固碳技术。物理封存固碳技术是将高体积分数 CO<sub>2</sub> 注入到深海或地质底层将其暂时封埋起来, 由于高体积分数 CO<sub>2</sub> 收集和浓缩成本高, 且需要选择合适的地质环境和空间对其进行封存, 限制了该方法的应用。化学固碳技术是

利用吸附材料(如 LiOH)直接吸附固定或通过添加碱性中和试剂以碳酸盐或碳酸氢盐的形式固定 CO<sub>2</sub>, 该方法相对安全且具有永久性, 但具有试剂用量大和固碳成本高等缺点。生物固碳技术具有环境友好和可持续发展等优点, 是目前世界上最主要和最有效的固碳方式之一<sup>[1]</sup>。

基于生物固碳技术的 CO<sub>2</sub> 资源化利用技术也受到越来越多的关注。该技术将 CO<sub>2</sub> 作为原料通过 CO<sub>2</sub> 资源化利用方式生产生物燃料、化学品及食物等物质, 用以构建低碳、绿色的资源化利用的新能源体系<sup>[2]</sup>。

本文首先对生物固碳技术中的光合作用固碳和微生物电化学固碳原理分别进行了阐述, 然后介绍了用于光合作用固碳的光生物反应器以及 CO<sub>2</sub> 资源化利用方式, 包括微藻固碳制甲烷、微藻固碳制生物燃料、微藻处理废水、微藻制蛋白质等, 最后对

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-08

基金项目: 中国华电科工科技项目(CHECKJ17-02-08)

其他生物固碳及资源化利用方式进行了介绍,包括微生物电化学合成甲烷、深地微生物制备短链脂肪酸(如甲酸、乙酸、乳酸)等,并对未来基于生物固碳技术的CO<sub>2</sub>资源化利用技术的重点研究方向进行了展望,以期为碳达峰、碳中和目标的实现提供可选路径。

### 1 生物固碳原理

#### 1.1 光合作用固碳原理

光合作用固碳是自养生物通过光合作用吸收无机碳(CO<sub>2</sub>)转化为有机物的过程,目前常采用的高效固碳生物体有微藻、蓝细菌和厌氧光合细菌等,其中微藻对太阳光的单位面积利用率是普通高等植物的10倍以上。两类自养微生物转化CO<sub>2</sub>机理示意如图1所示。由图1可知,在光合作用过程中,生物体经历开尔文循环、乙酰辅酶A循环、4C循环和还原性三羧酸循环多个循环过程,将CO<sub>2</sub>还原成[CH<sub>2</sub>O]及其他复杂的细胞物质,且该过程消耗大量三磷酸腺苷(ATP)和[H]。

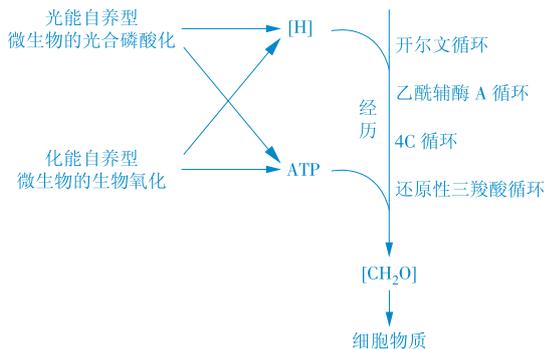


图1 两类自养微生物转化CO<sub>2</sub>机理示意<sup>[3]</sup>

Fig. 1 CO<sub>2</sub> conversion mechanism of two types of autotrophic microorganisms<sup>[3]</sup>

#### 1.2 微生物电化学固碳原理

生物电化学法是利用微生物为催化剂进行阳极氧化和阴极还原的生物电化学技术,是一种模仿自然光合作用过程而构建的人造固碳系统<sup>[4]</sup>。微生物电合成工作原理如图2所示。由图2可知,该系统将细胞作为生物催化剂来驱动固态电极上的氧化反应和还原反应,在阳极上发生氧化反应,在阴极上发生还原反应,产生甲烷、乙醇、甲酸、乙酸和2-巯基丁酸、丁酸、己酸和辛酸等能源物质及有机化学品<sup>[5-6]</sup>。在设计微生物电合成系统的时候需要选择合适的微生物,微生物需要具有吸收和同化电极上电子的能力、固定CO<sub>2</sub>的能力,以及特异性生产目标产物的能力。此外,还应考虑微生物自身的生理代谢特征,如微生物的厌氧或好氧特性、生长速率、生产速率、遗传可操作性等问题。

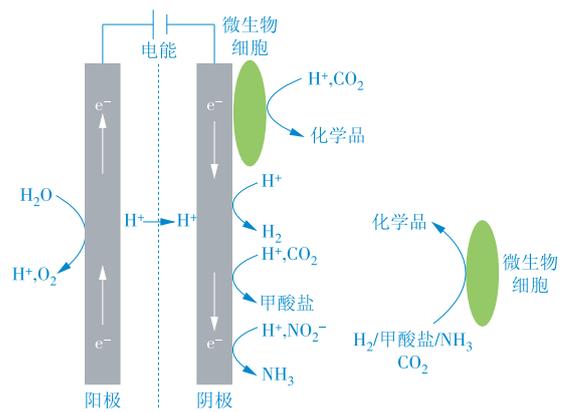


图2 微生物电合成工作原理示意<sup>[6]</sup>

Fig. 2 Working principle of microbial electrosynthesis<sup>[6]</sup>

### 2 微藻固碳及资源化利用

在高效固定转化CO<sub>2</sub>的微生物种中,微藻因生长速度快、产物丰富、适应能力强等优点而成为固碳生物的典型代表,它的CO<sub>2</sub>固定效率为一般陆生植物的10~50倍,已在食品、生物柴油、环境治理等多个方面广泛应用。地球上现今存活的微藻已超过2万种,主要分布于海洋、河流、湖泊和河塘的土壤中。目前研究较多的微藻种类主要有蓝藻门、绿藻门和金藻门等,其中小球藻、螺旋藻、栅藻和实球藻的微观形貌如图3所示<sup>[7]</sup>。微藻细胞内有超过50%的碳量,每生产1t微藻大约消耗1.5tCO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>,因此微藻在CO<sub>2</sub>减排方面备受关注。

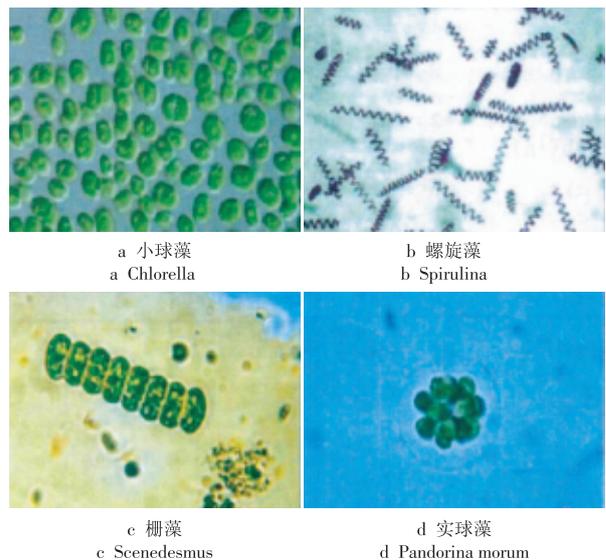


图3 微藻显微图<sup>[7]</sup>

Fig. 3 Micrograph of microalgae<sup>[7]</sup>

#### 2.1 微藻固碳反应器

光生物反应器是指生物通过光合作用固定CO<sub>2</sub>的培养装置,它的光能利用效率(最高可达18.0%以上)远高于一般陆生植物和森林的光能利用效率

(仅为0.2%左右)。目前最常见的光生物反应器主要包括开放式光生物反应器和封闭式光生物反应器,两者优缺点的对比见表1<sup>[7,9]</sup>。

表1 开放式和封闭式光生物反应器的优缺点对比<sup>[10]</sup>

Tab. 1 Advantages and disadvantages of open and closed photobioreactors<sup>[10]</sup>

项目	开放式系统	封闭式系统
污染的危险性,建造成本	高,低	低,高
水分损失,CO <sub>2</sub> 损失	高,高	低,几乎没有
过程控制,维护难易程度	复杂,容易	相对简单,困难
生产的重复性	变化不定	在一定限度内可能达到
对天气的依赖性,产物浓度	高,低	低,高

### 2.1.1 开放式光生物反应器

开放式光生物反应器是开发最早、应用最为广泛的一种培养方式,一般采用湖泊、池塘以及人造圆形池和跑道池等形式。开放式光生物反应器具有技术简单、投资低廉等优点,但也存在占地面积大、培养条件不稳定、易受污染、培养基水分蒸发损失大等缺点。为了解决最早的开放式光生物反应器存在的部分问题,叠加式多层光生物反应器应运而生(如图4所示)。该光生物反应器的叠加式构造可以减少反应器的占地面积,每层中空托盘结构可以最大限度地减少反应器内部污垢对光的穿透性影响,可以推广应用于占地面积小的废水处理厂或农场等领域<sup>[1]</sup>。

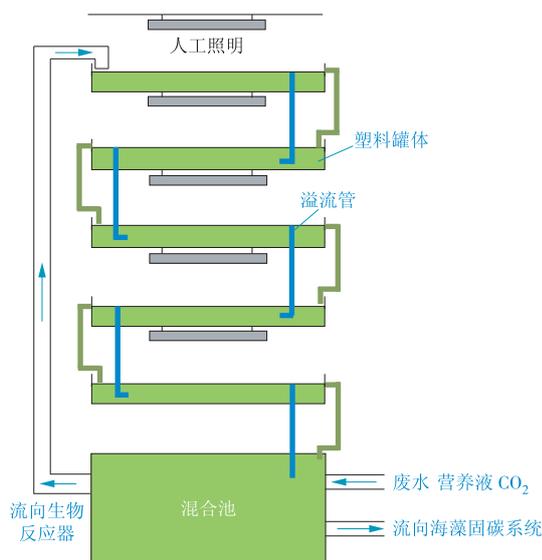


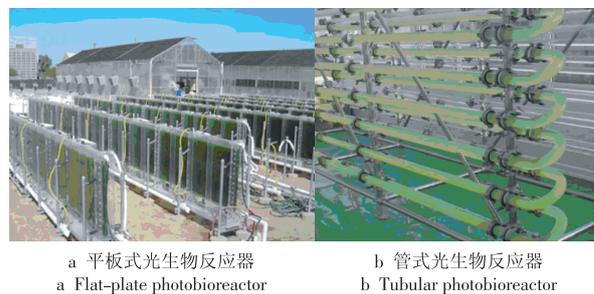
图4 叠加式光生物反应器固定CO<sub>2</sub>示意<sup>[1]</sup>

Fig. 4 CO<sub>2</sub> fixation in a superimposed photobioreactor<sup>[1]</sup>

### 2.1.2 封闭式光生物反应器

封闭式光生物反应器属于可控制的封闭式体系,它可以克服开放式光生物反应器的许多缺点,具有微藻生物质产率高、培养条件有效可控、能够实现纯种培养、采收成本和水耗低等优点,也适宜

培养有开发价值的微藻(如基因工程微藻),已逐渐发展成为生产高附加值微藻产品的主要技术平台。目前2种最常见的封闭式光生物反应器是平板式光生物反应器和管道式光生物反应器,如图5所示。



a 平板式光生物反应器  
a Flat-plate photobioreactor  
b 管式光生物反应器  
b Tubular photobioreactor

图5 封闭式光生物反应器<sup>[1]</sup>

Fig. 5 Closed photobioreactor<sup>[1]</sup>

#### 2.1.2.1 平板式光生物反应器

平板式光生物反应器可通过改变反应器方向和倾斜角度以适时调整光强来适应细胞的生长需求,具有单位面积安装率高、占地面积小、光能利用率高、面积产率高、气液传质能力强等优点,但存在能耗高和对反应器材质性能要求高等缺点,在实际应用过程中存在困难<sup>[11]</sup>。

#### 2.1.2.2 管道式光生物反应器

管道式光生物反应器由光吸收单元、气体交换单元和循环系统组成。光吸收单元是由硬质的玻璃管或可弯曲的透明塑料管构成,微藻培养液在其中循环流动,实现自身生长和产物的积累;气体交换单元主要作用是解除管道中积累的高浓度溶解氧,补充微藻生长所需要的碳源;循环系统的主要作用是支持足够的混合效果且保证液体剪切力不会对藻细胞造成明显损伤。

#### 2.1.2.3 新型封闭式光生物反应器

Lam等<sup>[12]</sup>通过在鼓泡柱式光生物反应器中加入隔板,在隔板作用下上升的CO<sub>2</sub>气泡可以左右摆动并缓缓上升,从而改善其内部流场,增强流体径向混合程度,提高CO<sub>2</sub>吸收速率。李静雅等<sup>[13]</sup>为了解决微藻光生物反应器产量低的问题,开发出新型光内柱式微藻光生物反应器,以能够耐受高体积分数CO<sub>2</sub>的诱变小球藻为研究对象进行试验,结果表明,新型光内柱式反应器可以使气液传递效率提高24.3%,固碳速率可提高47.7%,培养结束时生物质干重增加82.4%,达到1.66 g/L。

## 2.2 微藻固碳的影响因素

### 2.2.1 光照和光周期

光照是微藻进行光合作用固碳的先决条件,光周期是影响微藻固碳能力的主要因素。微藻的生长速率随光照强度的增强而增加,直达到光饱和

为止。杨忠华等<sup>[14]</sup>研究发现,不同光周期会对海洋微藻产生不同的影响,光周期过短或过长均会导致细胞生长受到抑制,使得细胞密度、叶绿素 a 和蛋白质含量显著降低,只有光周期在 6~18 h 内,藻株的细胞密度、叶绿素 a 和蛋白质含量等指标才会达到较高水平。Eduardo 等<sup>[15]</sup>研究了在鼓泡式光生物反应器内光周期对微藻生物量和固定 CO<sub>2</sub> 能力的影响,结果表明,在连续光照条件下微藻的固碳能力高达 99.69%,但有些微藻随着光周期的增长,其细胞密度和生长量反而下降。

### 2.2.2 温度和 pH 值

温度和 pH 值影响微藻光合作用及固碳效率的 2 个重要因素。温度对微藻生长影响的总趋势是随着温度降低,脂肪酸不饱和度增加,生长速度变缓,生物量降低,固碳效率也显著降低。在微藻自养过程中,15~30 ℃ 是最适应微藻生长的温度。当低于 15 ℃ 时,微藻生长缓慢;当高于 35 ℃ 时,也会导致微藻生长缓慢甚至死亡。Yue 等<sup>[16]</sup>研究发现,小球藻在 20~25 ℃ 时生长速率随温度的升高而上升,在 25~30 ℃ 时生长速率变化不明显,40 ℃ 时生长受到抑制,但仍保持较高的细胞浓度。

pH 值是通过影响微藻细胞内代谢酶的活性和藻细胞对离子的吸收利用而影响微藻的生理代谢。Kajiwara 等<sup>[17]</sup>研究发现,不同 pH 值范围(5.4~8.0)对聚球藻固碳能力产生不同的影响,在 pH 值为 5.4 时聚球藻生长较慢,当 pH 值为 6.8 时其生长速率达到最大值。

### 2.2.3 CO<sub>2</sub> 浓度和吸收率

不同的微藻对 CO<sub>2</sub> 的耐受性不同,有些微藻在低 CO<sub>2</sub> 体积分数条件下能正常生长,而有些微藻在高浓度 CO<sub>2</sub> 条件下才会显示出高效的生长速率。研究发现,极高 CO<sub>2</sub> 体积分数会对微藻细胞产生麻醉作用,抑制细胞生长和光合作用水平,并出现生长的“滞后期”。目前,在极高 CO<sub>2</sub> 体积分数下能够生长的藻类主要有海滩绿球藻、小球藻和栅藻等。Yue 等<sup>[16]</sup>优选出一种耐高体积分数 CO<sub>2</sub> 的小球藻,当 CO<sub>2</sub> 体积分数为 10% 或 20% 时生长速率达到最大值,当 CO<sub>2</sub> 体积分数为 30% 和 50% 时仍能保持较高的生长速率,当 CO<sub>2</sub> 体积分数为 70% 时生长速率较慢。

### 2.2.4 CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的传质过程

CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的传质过程是影响微藻生长及固碳效率的关键因素。微藻生长所需要的 CO<sub>2</sub> 因传质系数低而限制其气液传送过程;微藻光合作用产生的 O<sub>2</sub> 积累到一定浓度也会抑制微藻的生长。目前通过增加供气流速或提供湍流区域从而提高气体的传

质率和液体混合效率。但过高的湍流和剪切效应会损伤微藻细胞从而影响其生长<sup>[18]</sup>。Cheng 等<sup>[19]</sup>在中空纤维膜反应器中考察了小球藻的固碳效率,研究表明,该反应器能有效去除微藻光合作用中产生的 O<sub>2</sub> 从而使其 CO<sub>2</sub> 固定能力提高了 3 倍。

## 2.3 微藻资源化利用方式

### 2.3.1 微藻制甲烷

#### 2.3.1.1 微藻发酵制甲烷

藻类发酵制备甲烷技术是指微生物在无氧条件下分解微藻所含的各种有机物质从而产生甲烷技术。通过该技术可以将微藻完全转化为甲烷和 CO<sub>2</sub>, 二者的体积比约为 3:2。高春燕等<sup>[20]</sup>研究发现,藻类发酵制备甲烷过程受原料预处理、原料成分和颗粒大小、发酵温度、发酵料液 pH 值、接种率等因素的影响,而且不同藻类具有不同的发酵制甲烷能力,其中巨藻是甲烷成分含量最高的藻类。

#### 2.3.1.2 微藻裂解制甲烷

微藻裂解制甲烷技术是指将微藻浓缩干燥后通过高温裂解或催化裂解将其转化为气态或液态产物的技术,采用该技术获得的产物包括 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO, H<sub>2</sub>CO 和 NH<sub>3</sub> 等。催化裂解技术是指在温和条件下采用贵金属(如 Rh 和 Pt)或 Co 和 Ni 作催化剂对藻类进行催化裂解反应从而得到甲烷的技术。研究表明,采用贵金属催化剂与 Co 和 Ni 催化剂相比具有较弱的积碳作用,更有利于产生甲烷<sup>[21]</sup>。

### 2.3.2 微藻制生物燃料

生物燃料是指利用大自然的动、植物资源而得到的高效、污染少的能源,典型代表是生物柴油和生物质油。微藻是水生植物的一种,石油源自远古藻类化石中的脂肪酸,它特有的化学组成和结构注定使其成为获得生物柴油和生物质油的优良原料来源,许多微藻的油脂含量可达干重的 60%。目前通过利用高温高压液化技术或超临界 CO<sub>2</sub> 萃取技术从藻类细胞中获得油脂,再通过酯交换技术转变为脂肪酸甲酯(也称作生物柴油);还可以利用微藻加热到 500 ℃ 左右,使其分解转化为其他液体、固体及气体,用以生产高芳烃、高热值、高稳定性、高辛烷值的生物质油以及焦炭、合成气、氢气等多种燃料物质<sup>[22]</sup>。

以色列锡姆生物公司从发电厂排放的废气中分离出 CO<sub>2</sub>, 冷却后将其释放到养殖海藻的池塘中,从而制取生物燃料<sup>[23]</sup>。缪晓玲等<sup>[24]</sup>通过异样转化细胞工程技术获得了高脂含量的异样小球藻细胞,其脂含量高达细胞干重的 55%(质量分数),再经过蒸馏水洗、冷冻干燥、正己烷萃取油脂和分离除去萃取剂等方式获得生物柴油。程军等<sup>[25]</sup>采用介孔 Y

分子筛负载金属镍制成双功能催化剂,在固定床反应器中催化微藻生物柴油将其转化为航空燃油。苗长林等<sup>[26]</sup>采用小球藻和离子液体组合物分别作为原料和提取催化剂,利用微波辅助原位法制备微藻生物柴油,研究发现微波和离子液体对制备生物柴油有协同促进作用,离子液体起到催化、提取与增溶的作用,微波强化传质传热过程,缩短酯交换反应时间,降低反应温度。

### 2.3.3 微藻处理污水

微藻作为能进行光合作用并产生氧气的真核生物,能够通过利用污水中的氮磷等物质和空气或烟道中的CO<sub>2</sub>实现自身的快速繁殖,产生具有高附加值的产物,实现生物固碳和废水净化两大功能。张志忍等<sup>[27]</sup>在微重力条件下分别研究了小球藻在4种废水中均具有较强的适应能力,通过高体积分数CO<sub>2</sub>时,能够有效地吸收污水中的氮磷等主要污染物质并有效去除化学需氧量(COD),并且小球藻的油脂产率和固碳效率均有显著提升。赵阳国等<sup>[28]</sup>研究发现,在水中添加Fe<sup>3+</sup>,Zn<sup>2+</sup>等金属离子可以提高微藻生物的产量,同时促进其细胞内油脂的积累,将其培养13 d后生活污水中氨氮和磷的去除率高达95.0%,COD去除率可达72.9%。

### 2.3.4 微藻制蛋白质

微藻能够利用光和CO<sub>2</sub>合成有机物质,如蛋白质、多糖、脂类和维生素等。蛋白核小球藻在微藻生物中蛋白质的质量分数最高(不低于50%),且氨基酸种类齐全,必需氨基酸总量接近鱼粉、啤酒酵母,高于一般植物性蛋白。此外,微藻还能产生很多种多糖物质,如硫酸多糖具有独特的化学结构和药用价值。

## 3 其他生物固碳及资源化利用

### 3.1 蓝细菌固碳及资源化利用

蓝细菌是一种利用二氧化碳生产生物燃料和化学品的好宿主。与微藻相比,蓝细菌具有更加成熟的基因操作手段。目前源自蓝细菌细胞内代谢产物的产品范围已扩大至生物燃料和生物塑料前体,包括各种醇、有机酸、糖和脂肪酸等。

### 3.2 微生物电化学固碳及资源化利用

目前用于微生物电合成的微生物主要包括产甲烷菌、产乙酸菌、部分氧气还原微生物等。Cheng<sup>[29]</sup>等以产甲烷菌作为生物电化学系统阴极催化剂,还原CO<sub>2</sub>产生CH<sub>4</sub>,库伦效率高达96%。Nichols等<sup>[30]</sup>采用水裂解产生的H<sub>2</sub>作为还原剂,利用甲烷八叠球菌作为生物电化学系统阴极催化剂,还原CO<sub>2</sub>合成甲烷。Ganigue等<sup>[31]</sup>采用CO<sub>2</sub>作为唯一碳

源,通过产乙酸菌微生物作为生物电化学系统阴极催化剂,生产得到丁酸。研究发现,产乙酸菌因具有能耗较低的生物固碳途径和可供使用的基因组信息等优点是目前微生物电合成系统中最常使用的微生物。

### 3.3 油田微生物固碳及资源化利用

高温油田可以作为天然的“原位生物反应器”,利用深地微生物把CO<sub>2</sub>转化为具有高附加值的物质,不仅能够实现碳减排,还能使该技术在经济和能源层面更具有吸引力<sup>[32]</sup>。在深地微生物利用CO<sub>2</sub>生长的过程中,生物酶的催化作用将CO<sub>2</sub>转化为一系列的有机物质,包括甲烷、短链脂肪酸(如甲酸、乙酸、乳酸)、醇类(如乙醇、丁醇、丁二醇)和酮类(如丙酮)等。有报道表明少数微生物在富集CO<sub>2</sub>条件下可以保持生物活性,活性主要受pH值、温度、压力、电子供体和电子受体浓度、营养物质及代谢物浓度等环境因子的影响<sup>[33-34]</sup>。

## 4 结论

世界化石燃料正在不断消耗,温室气体累积效应不断突显,以CO<sub>2</sub>为原料的生物固碳技术即可以减少CO<sub>2</sub>排放,又可以通过提供碳基燃料、化学品和食物等方式实现CO<sub>2</sub>的资源化利用。因此,考虑能源安全和全球变暖等因素,随着“双碳”目标的推进,基于生物固碳的CO<sub>2</sub>资源化利用技术在未来具有广阔的应用前景。未来的研究方向可能集中在以下几个方面。

(1)开发新型光生物反应器系统,实现微藻大规模培养以及高附加值产品的生产。

(2)通过基因工程改造和合成生物学技术,将蓝细菌和微藻打造成生产生物燃料的新能源制造平台。

(3)油田微生物CO<sub>2</sub>的原位转化技术具有良好的发展潜力。

## 参考文献:

- [1]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,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.
- [2]王凯,贺明丽,王梦,等.以CO<sub>2</sub>为原料的绿色生物制造[J].化工进展,2019,38(1):538-544.  
WANG Kai, HE Mingli, WANG Meng, et al. Green biological manufacture with CO<sub>2</sub> as raw material[J].Chemical Industry

- and Engineering Progress, 2019, 38(1):538-544.
- [3]赵毅,钱新风,张自丽.二氧化碳资源化技术分析及应用前景[J].科学技术与工程,2014,14(16):175-183.  
ZHAO Yi, QIAN Xinfeng, ZHANG Zili. Technical analysis and application prospect on resource utilization carbon dioxide [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(16):175-183.
- [4]蒋海明,季祥,司万童,等.生物电化学系统还原二氧化碳产甲烷研究进展[J].土木建筑与环境工程,2015,37(3):127-133.  
JIANG Haiming, JI Xiang, SI Wantong, et al. Literature review of reduction of carbon dioxide to methane with bioelectrochemical systems [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015, 37(3):127-133.
- [5]郭利,苗利宁,刘文强,等.CO<sub>2</sub>资源化利用的研究进展[J].化学工程,2019,47(1):6-9.  
GUO Li, MIAO Lining, LIU Wenqiang, et al. Research progress of CO<sub>2</sub> resource utilization [J]. Chemical Engineering (China), 2019, 47(1):6-9.
- [6]朱华伟,张延平,李寅.微生物电合成-电能驱动的CO<sub>2</sub>固定[J].中国科学,2016,46(12):1388-1399.  
ZHU Huawei, ZHANG Yanping, LI Yin. Microbial electrosynthesis: CO<sub>2</sub> fixation driven by electricity [J]. Science in China (Series C), 2016, 46(12):1388-1399.
- [7]孙中亮.低浓度二氧化碳培养微藻的吸收强化和烟道气组分调变[D].北京:中国科学院过程工程研究所,2015.
- [8]CHISTI Y. Biodiesel from microalgae [J]. Biotechnology Advances, 2007, 25(3):294-306.
- [9]BECKER E W. Microalgae: Biotechnology and microbiology [M]. England: Cambridge University Press, 1994.
- [10]孔乙杰,王研,王蕊.微藻固定CO<sub>2</sub>协同处理污水研究进展[J].轻工科技,2019,35(8):112-113.
- [11]TREDICI M R. Photobiology of microalgae mass cultures: Understanding the tools for the next green revolution [J]. Biofuels, 2010, 1(1):143-162.
- [12]LAM M, LEE K. Cultivation of *Chlorella vulgaris* in a pilot-scale sequential-baffled column photobioreactor for biomass and biodiesel production [J]. Energy Conversion and Management, 2014(88):399-410.
- [13]李静雅.微藻光生物反应器开发及正渗透藻水分离的研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [14]杨忠华,杨改,李方芳,等.利用微藻固定实现减排的研究进展[J].生物加工过程,2011(9):66-75.  
YANG Zhonghua, YANG Gai, LI Fangfang, et al. Recent progress in fixation of CO<sub>2</sub> with microalgae for carbon emission reduction [J]. Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 2011(9):66-75.
- [15]EDUARDO J, CARLOS H, FRANCO T. Effect of light cycles (night/day) on CO<sub>2</sub> fixation and biomass production by microalgae in photobioreactor [J]. Chemical Engineering and Processing, 2009, 48:306-310.
- [16]YUE L, CHEN W. Isolation and determination of cultural characteristics of a new highly CO<sub>2</sub> tolerant fresh water microalgae [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46:1868-1876.
- [17]KAJIWARA S, YAMADA H, OHKUNI N, et al. Design of the bioreactor for carbon dioxide fixation by *Synechococcus* PCC7942 [J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38:529-532.
- [18]PIRES J, ALVIM F M, MARTINS F, et al. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16:3043-3053.
- [19]CHENG L, ZHANG L, CHEN H, et al. Carbon dioxide removal from air by microalgae cultured in a membrane-photobioreactor [J]. Separation and Purification Technology, 2006, 50:324-329.
- [20]高春燕,刘慧,叶乃好,等.大型海藻发酵生产甲烷技术研究[J].中外能源,2011(4):27-35.  
GAO Chunyan, LIU Hui, YE Naihao, et al. A study on technologies for producing methane on a large scale by fermentation of algae [J]. Sino-Global Energy, 2011(4):27-35.
- [21]孙书晶,骆立钢,曾琴.藻类生物质气化产甲烷研究进展[J].化学工程与装备,2017(6):219-220.
- [22]嵇磊,张利雄,姚志龙,等.利用藻类生物质制备生物燃料研究进展[J].石油学报(石油加工),2007,23(6):1-5.  
JI Lei, ZHANG Lixiong, YAO Zhilong, et al. Review on the producing bio-fuel from microalgae [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2007, 23(6):1-5.
- [23]陆小青.藻类生物燃料的研究进展[J].城市道桥与防洪,2012(6):393-398.  
LU Xiaoqing. Study of algae biofuels [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012(6):393-398.
- [24]缪晓玲,吴庆余.微藻生物质可再生能源的开发利用[J].可再生能源,2003(3):13-16.  
MIAO Xiaoling, WU Qingyu. Exploitation of biomass renewable energy sources of microalgae [J]. Renewable Energy Resources, 2003(3):13-16.
- [25]程军,张曦,刘建峰,等.镍基介孔Y催化微藻生物柴油制航空燃油[J].太阳能学报,2020,41(5):224-228.  
CHENG Jun, ZHANG Xi, LIU Jianfeng, et al. Catalytic hydroprocessing of microalgae biodiesel to renewable jet fuels over Ni/MESO-Y difunctional catalyst [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(5):224-228.
- [26]苗长林,吕鹏梅,王忠铭,等.微波辅助组合离子液体直接制备微藻生物柴油[J].太阳能学报,2021,42(2):233-238.  
MIAO Changlin, LYU Pengmei, WANG Zhongming, et al.

- Preparation of microalgae biodiesel by direct transesterification under microwave-assisted ionic liquid composite conditions [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(2):233-238.
- [27] 张志忍. 模拟微重力下利用二氧化碳培养小球藻的研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
- [28] 赵阳国, 师振华, 王亚洁, 等. 利用微拟球藻去除污水中氮磷及生产富油生物质 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5):2367-2374.
- ZHAO Yangguo, SHI Zhenhua, WANG Yajie, et al. Removal of nitrogen and phosphorus in urban sewage and simultaneous production of oil-rich biomass by *nannochloropsis* sp [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(5):2367-2374.
- [29] CHENG S A, XING D F, CALL D F, et al. Direct biological conversion of electrical current into methane by electromethanogenesis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(10):3953-3958.
- [30] NICHOLS E M, GALLAGHER J J, LIU C, et al. Hybrid bioinorganic approach to solar-to-chemical conversion [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112:11461-11466.
- [31] GANIGUE R, PUIG S, VILANOVA P, et al. Microbial electrosynthesis of butyrate from carbon dioxide [J]. *Chem Commun*, 2015, 51:3235-3238.
- [32] HICKS N, VIK U, TAYLOR P, et al. Using prokaryotes for carbon capture storage [J]. *Trends in Biotechnology*, 2017, 35(1):22-32.
- [33] MU A, MOREAU J. The geomicrobiology of CO<sub>2</sub> geosequestration: A focused review on prokaryotic community responses to field-scale CO<sub>2</sub> injection [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015(6):263.
- [34] YANAGAWA K, MORONO Y, BEER D, et al. Metabolically active microbial communities in marine sediment under high-CO<sub>2</sub> and low-pH extremes [J]. *The ISME Journal*, 2013, 7(3):555-567.

(本文责编: 齐琳)

#### 作者简介:

胡小夫(1985—),女,山东乳山人,高级工程师,工学博士,从事火电厂烟气节能环保等方面的工作(E-mail: huxf@chec.com.cn)。