

利用生物固碳技术生成生物基产品

王素蕾 翟怡宁 陈艳姣 郭叶飞 李季 曹浩然

黑龙江大学 建筑工程学院

DOI:10.12238/eep.v7i3.1977

[摘要] 随着全球气候变化对环境造成日益严重的威胁,寻找有效的碳减排技术成为亟须解决的问题。生物固碳技术,通过生物过程捕捉和存储大气中的二氧化碳,为减少温室气体排放提供了一种潜在的解决方案。同时,发展生物基产品作为替代传统化石燃料基产品的策略,不仅能减轻环境压力,还能推动经济向可持续发展模式转型。因此利用生物固碳技术生成生物基产品成为当前研究的重点,本文主要叙述了生物固碳技术的原理及其生成的生物基产品及未来的研究方向,旨在优化生物固碳过程,提高生物基产品的合成效率和降低生产成本提供理论依据

[关键词] 生物固碳; 生物基产品; 环境问题

中图分类号: G633.91 **文献标识码:** A

Utilizing biocarbon fixation technology to produce bio-based products

Sulei Wang Yining Zhai Yanjiao Chen Yefei Guo Ji Li Haoran Cao

School of Civil Engineering, Heilongjiang University

[Abstract] As global climate change increasingly threatens the environment, finding effective carbon reduction technologies has become an urgent issue. Biological carbon sequestration technology, by capturing and storing atmospheric carbon dioxide through biological processes, offers a potential solution for reducing greenhouse gas emissions. At the same time, developing biobased products as alternatives to traditional fossil fuel-based products not only alleviates environmental pressure but also promotes the transition of the economy towards a sustainable development model. Therefore, utilizing biological carbon sequestration technology to produce biobased products has become a focus of current research. This paper mainly describes the principles of biological carbon sequestration technology, the biobased products generated, and future research directions, aiming to provide theoretical support for optimizing the biological carbon sequestration process, improving the synthesis efficiency of biobased products, and reducing production costs.

[Key words] biological carbon sequestration; Bio-based products; Environmental problems

在过去150年里,由于对化石燃料的依赖和过度使用,大气中二氧化碳的浓度已经从大约250 ppm急剧上升至超过418 ppm。二氧化碳是地球碳循环的核心组成部分,光合作用的主要原料之一,但它在大气中的累积增加被公认为温室气体效应的主要驱动力。这一效应导致全球气候变暖,进而引发了一系列生态和环境问题,包括极地冰盖融化、生物地球化学循环的变化、降水模式的改变、海洋酸化、湖泊富营养化、生态群落的失衡、某些物种的灭绝和对土壤肥力的负面影响。正是这种二氧化碳浓度的不断攀升,促使全球对于气候变化的深刻关注和必要的应对措施^[1]。

在这样的背景下,寻找有效的温室气体减排方法成为了国际社会的重要议题。生物固碳技术,作为一种通过利用生物过程捕捉和存储大气中的二氧化碳(CO₂)的技术,近年来受到了广泛

关注。与此同时,随着可持续发展理念的深入人心,开发生物基产品以替代传统的化石燃料基产品,也成为了研究和工业界的热点。生物固碳技术凭借其环境友好和可持续发展的优势受到了日益增加的关注。生物固碳是通过使用微生物、植物或其他生物体将大气中的二氧化碳转化为有机物质的过程,这些有机物质可以是燃料、化学品或其他有用的生物基产品。与传统的工业碳捕集和封存技术相比,利用生物固碳技术生产生物基产品不仅能减少温室气体排放,还能促进资源的循环利用,具有重要的环境和社会经济价值。

1 生物固碳反应

生物固碳技术涉及利用生物体,如微生物、植物等,通过自然或工程化的途径将大气中的二氧化碳(CO₂)转化为有机物质,从而实现碳的固定和存储^[2]。这些技术不仅有助于减少大气中

的二氧化碳浓度,降低温室效应,还能生产出燃料、化学品等有用的生物基产品。以下是几种主要的生物固碳技术详细介绍:

光合作用固碳:是最自然且广泛存在的生物固碳过程,通过植物、藻类和某些细菌的光合作用,将CO₂转化为有机物和氧气。植物通过叶绿体中的叶绿素吸收阳光能量,将水分子分解,释放氧气,并将CO₂转化为糖类有机物,这是一种直接从大气中捕获和固定CO₂的有效方法。

化学合成固碳:某些非光合作用微生物,如化学合成自养细菌,能够利用无机化合物(如氢气、硫化氢或铁离子等)作为能源,将CO₂固定成有机物。这一过程不依赖于太阳光,而是通过微生物细胞内的化学反应来实现CO₂的转化。Wood-Ljungdahl途径:这是一种通过特定微生物(如产乙酸细菌)在厌氧条件下将CO₂转化为乙酰辅酶A的过程,进而合成乙酸和其他生物分子。此途径是一种有效的碳固定机制,因为它涉及的能量消耗相对较低,适合在工业生产中应用^[3]。

其他生物固碳途径:如3-羟基丙酸途径、还原三羧酸循环(rTCA循环)等,这些途径也能够特定的微生物中固定CO₂,但相较于上述途径研究较少,应用也不太广泛。

利用微生物固定CO₂的途径,可以将CO₂转化为多种有用的生物基产品,这对于减少温室气体排放、开发可持续能源和材料至关重要。这些产品包括:生物燃料、生物表面活性剂、生物塑料和生物复合材料等。

通过利用不同微生物的固碳能力,我们不仅能够有效减少大气中的二氧化碳浓度,还能生产出对环境友好的生物基产品。表1则描述了利用微生物生产生物基产品的优势^[4]。

表1 微生物生成生物基产品的优势

微生物类型	优势	生物基产品
细菌	生长速度快,易于基因修改	生物燃料、生物塑料
藻类	高CO ₂ 固定率,能产生高脂肪含量	生物燃料、生物塑料
酵母	高乙醇产量,广泛研究	生物乙醇、生物化学品
真菌	能分解复杂有机物	酶、生物化学品

2 生物燃料

生物燃料是从自然界中的动植物资源中提炼出来的可再生能源,它们是对化石燃料的环保替代选择。这些燃料通常是液体形式的,例如生物乙醇、丙醇和生物柴油,可以用作汽油、柴油和航空燃料的替代品。生物燃料的一个显著优点是它们更容易生物降解,并且排放较少的有害气体,因此对环境造成的影响比传统化石燃料小。通过使用生物燃料,可以减少温室气体的排放,从而有助于减轻全球气候变化问题^[5]。

2.1 生物柴油.生物柴油主要是由脂肪酸甲酯(FAMEs)组成,这些甲酯是从各种天然可再生资源制得,尤其是通过藻类,如蓝藻。藻类是生产生物柴油的理想来源,因为藻类能够积累高含量的油脂,许多藻类的油脂占其干重的一半以上。这些油脂通常以

三酰甘油酯(TAG)的形式存在,使得藻类能够在恶劣环境下存活。通过高温高压液化或超临界CO₂萃取技术^[6],可以从藻类细胞中提取油脂,并进一步通过酯交换反应转化为FAME或生物柴油。生物柴油与化石柴油的物理性质相似,但它是无毒的且可生物降解的,对环境更加友好。

2.2 生物丙醇.早期能利用CO₂生产生物酒精的微生物主要集中在红杆菌和聚球藻中^[7]。乙醇作为传统汽油的替代品受到乙醇的能量密度较低(汽油的70%)这一事实的挑战。对当前的发动机技术和燃料基础设施具有腐蚀性。此外,它很容易吸收水,在储罐中会被稀释。而异丙醇的生物生产是可行的,异丙醇可部分替代汽油,它还代替甲醇用于酯化脂肪和油以生产生物柴油,异丙醇可以进一步脱水生成丙烯,以制备聚丙烯^[8]。据报道,通过代谢工程, *Clostridium beijerinckii* (贝氏梭菌) 的异丙醇滴定度超过1.5g/L。通过优化条件下的基因修饰,聚球藻也能够产生理想的2,3-丁二醇(2.38g/L)和1,2-丙二醇(150mg/L)^[9]。

3 生物表面活性剂

环境污染的增加是一个持续关注的问题,应开发可持续的环境技术来减少环境污染物,包括有机污染物和无机污染物,如碳氢化合物。生物表面活性剂是由细菌、酵母和真菌等多种微生物产生的生物活性剂^[10]。假单胞菌、钙醋酸不动杆菌、红球菌、沙雷氏菌、芽孢杆菌等都是公认的生物表面活性剂生产菌。微生物生物表面活性剂的生产是通过细菌在液体培养基中的培养过程以及碳源(如葡萄糖、甘油、果糖、甘露醇等)的存在来进行的。微生物发酵过程通常是通过消耗单一底物(即碳水化合物)或通过糖和脂质等两种来源的混合物来进行的^[11]。碳消耗和生物表面活性剂生产的几种代谢途径相互关联,包括微生物参与的产脂代谢途径和糖酵解循环,葡萄糖作为水溶性底物,通过糖酵解循环分解生成6-磷酸葡萄糖作为中间体,这是存在于生物表面活性剂亲水部分的碳水化合物的主要前体之一。生物表面活性剂的亲水部分是通过不同酶催化6-磷酸葡萄糖的途径上的连续步骤形成的如鼠李糖、海藻糖、槐糖、甘露糖等。当葡萄糖氧化生成丙酮酸并转化为初级碳代谢产物乙酰辅酶A时,就会形成疏水部分。下一步,草酰乙酸与乙酰辅酶A合并并转化为丙二酰辅酶A,进一步合成脂肪酸,作为脂质产量的前体。据Deziel等人所述,生物表面活性剂主要有四种类型:(1)糖脂,(2)磷脂,(3)脂蛋白或脂肽,(4)聚合物。目前对两种微生物表面活性剂的研究最为广泛。第一种是糖脂,以鼠李糖脂为代表。它由假单胞菌属产生,促进烷烃和其他疏水基质的降解^[12]。脂肽是第二类生物表面活性剂,其中环脂肽生物表面活性剂(CLPBS)具有一些重要的生物学应用,如抗菌、抗真菌或抗病毒特性、细胞溶解活性、抑制纤维蛋白凝块形成等。现在来说,芽孢杆菌也可以产生生物表面活性剂,但现在关于芽孢杆菌产生生物表面活性剂的报道很少。

4 生物塑料

塑料生产在所有现代经济体中都是必不可少的,因为塑料不可降解,在大多数的环境中都会积累,塑料生产主要通过化石

原料实现, 并对环境产生严重影响。此外, 全球石油衍生塑料的产量一直在增长, 2021年全国塑料制品产量为8004万吨, 到2022年全国塑料制品产量为7771.6万吨, 同比8004万降低了2.9%。经过了疫情科学管控及放开, 我国塑料制品产量虽有下降, 但在复工热潮等因素下, 将有望于2023年和2024年实现大幅增长。^[13]

聚羟基丁酸酯(PHB)是最常见的可生物降解聚合物, 纯化的PHB是一种可生物降解和生物相容的热塑性塑料, 其热性能和机械性能与石油化工衍生的聚丙烯相似。在*R. eutropha*和*Ideonella* sp. 中, CO₂可以被还原成PHB, 通常在营养限制条件下, 但要求碳源过量。一般来说, PHB是在碳库丰富、营养来源有限的胁迫条件下, 微生物细胞通过次生代谢产生的。第一步是在β-酮硫酶(Pha)存在下, 通过结合两个乙酰辅酶A分子形成乙酰辅酶A。第二个反应由乙酰辅酶A还原酶(PhaB)催化, 该酶指导形成(R)-3-羟基丁基-CoA还原辅酶A还原酶。第三步包括通过PHB合成酶(PhbC基因)聚合(R)-3-羟基丁基-CoA产生PHB^[14]。此外, 乙酰辅酶a催化合成的乙酰辅酶a在微生物的三羧酸循环(TCA)、脂肪酸生物合成、消耗CO₂最终产物PHB的多种代谢途径中发挥着重要作用。鉴于PHB对水和紫外线辐射的耐受性以及对O₂的不渗透性, PHB非常适合用作食品包装材料, 它也被应用于外科缝线。重要的是, PHB可以使用现有技术进行处理, 并与其他合成聚合物结合使用。这些引起了人们对这种聚合物商业化生产的极大兴趣。

5 生物复合材料

生物矿化是发生在微生物中的一种自然碳循环过程, 这是由于微生物作用导致矿物沉淀而对环境进行化学修饰所致。微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)是一种长期存在的生态友好过程, 发生在整个生态系统中, 如海洋、淡水和陆地生态系统。参与这种反应的微生物有蓝藻、真核微藻、芽孢杆菌和沙雷氏菌等。目前已经研究了不少钙化微藻物种, 如*Scytonema*、小球藻、绿球藻、聚球藻、聚球囊藻等, 以确定潜在的沉淀机制。碳酸盐矿物如方解石、球霏石依赖于微生物的代谢过程, 而方解石被认为是最常见的细菌碳酸盐形式。据报道, 在几种细菌和古细菌中, 细菌细胞壁的S层是形成CaCO₃的成核点, 也被认为是微生物对环境的调节反应。

6 展望

世界环境污染严重, 化石燃料正在不断地消耗, CO₂排放量过多导致的温室效应不断突显, 因此利用微生物固定CO₂生产生物基产品, 不仅可以减少CO₂的排放, 实现CO₂的资源化利用, 还可以生产出一些对环境友好的产品。然而由于生物量产品的产量较低, 且提取成本较高, 所以利用微生物生产生物基产品现在仍然是一个巨大的挑战, 因此利用微生物固定CO₂来生成生物基产品在中国并没有大范围应用, 目前大部分还仅限于实验室里。因此, 改进、综合生物技术方法, 降低微生物生产生物基产品的成本, 使这个方案在环境可持续性领域进行大范围的应用以及查看实际的应用效果如何, 是下一步科学家们研究的重点。

[参考文献]

- [1]Knohl Alexander, Veldkamp Edzo. Global change: indirect feedbacks to rising CO₂. [J]. *Nature*, 2011, 475(7355).
- [2]R. Lal. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools [J]. *Energy & Environmental Science*, 2008, 1(1).
- [3]Emerson David F, Woolston Benjamin M, Liu Nian, Donnelly Mackenzie, Currie Devin H, Stephanopoulos Gregory. Enhancing hydrogen-dependent growth of and carbon dioxide fixation by *Clostridium ljungdahlii* through nitrate supplementation [J]. *Biotechnology and bioengineering*, 2019, 116(2).
- [4]Ranjan M R, Bhardwaj P, Tripathi A. Microbial Sequestration of Atmospheric Carbon Dioxide. 2021.
- [5]Jyoti Singh, Indu Shekhar Thakur. Evaluation of cyanobacterial endolith *Leptolyngbya* sp. ISTCY101, for integrated wastewater treatment and biodiesel production: A toxicological perspective [J]. *Algal Research*, 2015, 11.
- [6]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.
- [7]Jajesniak Pawel, Eldin Mohamed Omar Ali Hossam, Seng Wong* Tuck. Carbon Dioxide Capture and Utilization using Biological Systems: Opportunities and Challenges [J]. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 2014, 04(03).
- [8]Hanai T, Atsumi S, Liao J C. Engineered synthetic pathway for isopropanol production Rao Ashok, Sathivelu A., Mythili S.. *Genetic Engineering In BioButanol Production And Tolerance* [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2016, 59(0).
- [9]Fiechter Armin. Biosurfactants: moving towards industrial application [J]. *Trends in Biotechnology*, 1992, 10(6).
- [10]Moutinho Liza Fernandes, Moura Felipe Ramalho, Silvestre Rachel Carvalho, Romão Dumaresq Aline Silva. Microbial biosurfactants: A broad analysis of properties, applications, biosynthesis and techno-economical assessment of rhamnolipid production. [J]. *Biotechnology progress*, 2020, 37(2).
- [11]Deziel E, Paquette G, Villemur R, Lepine F, Bisailon J. Biosurfactant production by a soil pseudomonas strain growing on polycyclic aromatic hydrocarbons. [J]. *Applied and environmental microbiology*, 1996, 62(6).
- [12]陈家运. 可降解塑料迎来新标准资本纷纷入局抢市场 [N]. *中国经营报*, 2022-06-06(A07).
- [13]Carpine R, Olivieri G, Hellingwerf K J, et al. Industrial Production of Poly-β-hydroxybutyrate from CO₂: Can Cyanobacteria Meet this Challenge? [J]. *Processes*, 2020, 8(3): 323.
- [14]Manish, Kumar, Smita, et al. Carbon dioxide capture, storage and production of biofuel and biomaterials by bacteria: A review [J]. *Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes, Conversion Technologies, Biotransformations, Production Technologies*, 2018, 247: 1059-1068.