
暗发酵生物制氢研究进展：面向可持续能源的微生物产氢路径 MDPI Methane

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/42533.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

暗发酵生物制氢研究进展：面向可持续能源的微生物产氢路径 MDPI Methane。 论文标题：Biohydrogen Produced via Dark Fermentation: A Review

论文链接：<https://www.mdpi.com/2674-0389/3/3/29>

期刊名：Methane

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/methane>

氢能作为未来能源体系的重要载体，其质量能量密度高达122 kJ/g，约为化石燃料的2.75倍，且燃烧产物仅为水，具备显著的清洁属性。然而，当前全球约96%的氢气仍依赖天然气、石油和煤炭等化石资源通过热化学转化获得，该过程伴随大量碳排放。在碳中和目标驱动下，发展高效、低碳的可再生制氢技术成为能源转型的关键议题。暗发酵作为生物制氢的代表性路径，因工艺条件温和、底物适应性广且具备废弃物协同处理的潜力，正受到学术界与产业界的共同关注。

暗发酵与甲烷生产的协同关系尤为值得关注：暗发酵的液态副产物（富含挥发性脂肪酸）可作为厌氧消化产甲烷的理想底物，形成暗发酵制氢—厌氧消化产甲烷的两级串联工艺，实现底物化学能的梯级利用与能源回收最大化

1. 暗发酵产氢的核心代谢途径

暗发酵是严格厌氧或兼性厌氧微生物在无光照条件下，将有机物氧化并还原质子生成 H_2 的代谢过程。以葡萄糖为模式底物，其代谢路径可分为两大类：

PFL依赖途径（兼性厌氧菌为主）：葡萄糖经糖酵解生成丙酮酸，通过丙酮酸甲酸裂解酶（PFL）转化为乙酰-

CoA与甲酸，甲酸再由甲酸氢裂解酶（FHL）催化分解为 H_2 与 CO_2 。该途径的理论产氢上限为2 mol H_2 /mol葡萄糖，NADH需通过生成乙醇等还原性副产物实现再氧化。

PFOR依赖途径（严格厌氧菌为主）：丙酮酸通过丙酮酸铁氧还蛋白氧化还原酶（PFOR）生成乙酰-CoA与还原型铁氧还蛋白（Fdred），后者直接将电子传递至[FeFe]-氢酶催化产氢。在低 H_2 分压条件下，NADH亦可经NADH依赖型氢酶参与产氢，使理论产氢量提升至4 mol

H₂/mol葡萄糖。

值得注意的是，丁酸型发酵（产2 mol H₂/mol葡萄糖）与乙酸型发酵（产4 mol H₂/mol葡萄糖）在产氢效率上存在本质差异。乙酸型途径虽理论产率更高，但对代谢氢的利用效率和系统氧化还原平衡要求更为苛刻。

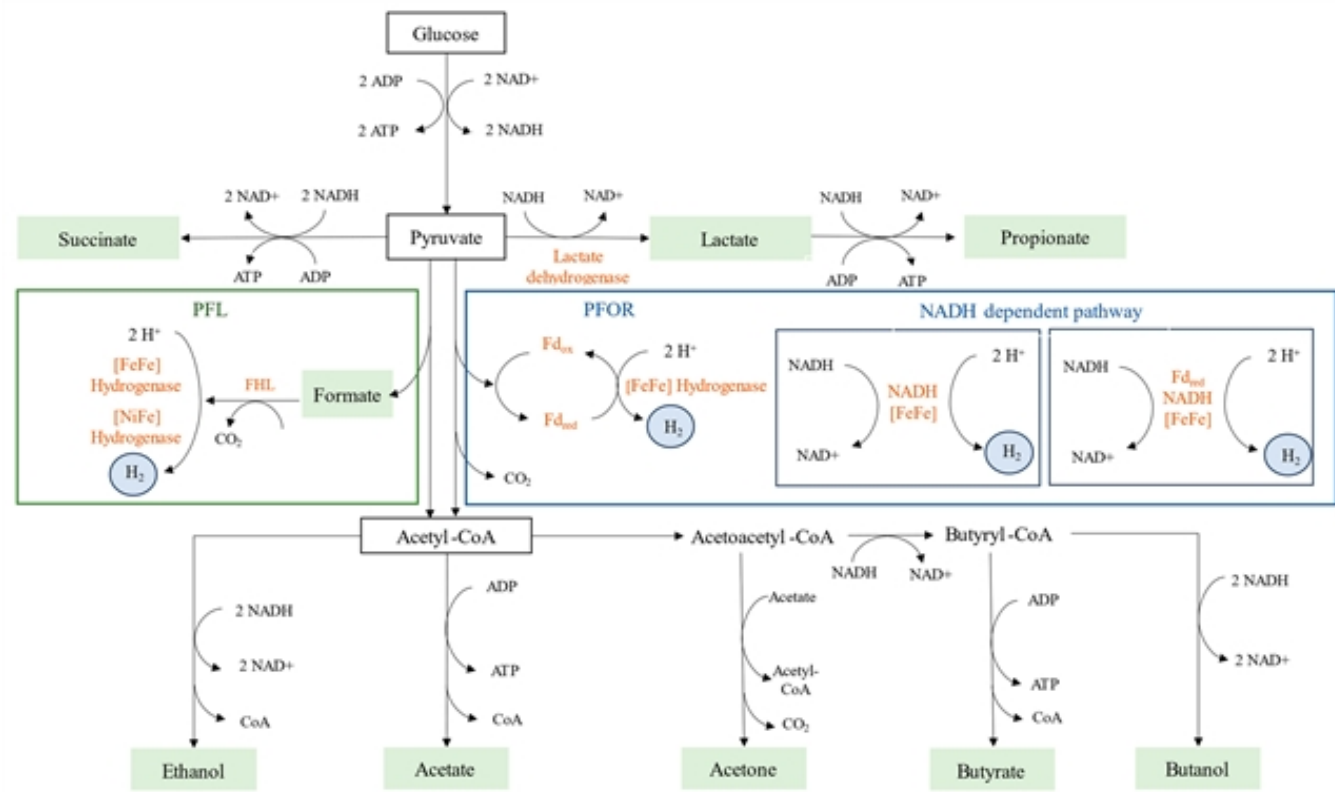


图1. 暗发酵代谢途径。

2. 影响暗发酵效率的关键参数

暗发酵的产氢效率受多种理化因子调控，各参数间的交互作用构成复杂的优化空间。研究表明，产甲烷菌活性在热力学上不利于产氢——当系统内甲烷生成被有效抑制时，氢气产率可提升至不含抑制剂的对照组的数倍以上。

参数 适宜范围/典型值 核心影响机制 温度 中温 30 – 40 ° C（兼性/严格厌氧菌）；高温 55 – 65 ° C（嗜热菌） 影响酶活性与微生物群落结构；高温有利于底物溶解与H₂溶解度降低 pH 5.5 – 7.0（初始） 直接调控氢酶活性；影响代谢副产物分布（低pH促进乙酸/丁酸生成，高pH有利于乙醇/乳酸途径） 水力停留时间（HRT） 4 – 12 h（产氢菌优选短HRT） 通过控制稀释速率筛选产氢菌并抑制产甲烷菌 H₂分压 越低越有利 高H₂分压使NADH氧化产氢反应热力学受限 有机负荷率（OLR） 依底物而异（20 – 100 g COD/L/d） 过高OLR导致渗透压上升、代谢转向产酸/醇，抑制产氢

3. 提高生物制氢产率的技术路径

(1) 过程集成策略

暗发酵的最大局限在于有机质不完全氧化导致的理论产氢上限受限（4 mol H₂/mol葡萄糖）。通过将暗发酵与光发酵或微生物电解池（MEC）串联，可显著提升底物的能量回收率：

- 暗发酵—光发酵耦合：光发酵细菌（紫色非硫细菌）可利用暗发酵液中的挥发性脂肪酸继续产氢，理论总产氢量可达12 mol H₂/mol葡萄糖。
- 暗发酵—微生物电解池耦合：MEC通过外电路提供微小电压，可进一步氧化暗发酵液中的乙酸等残余有机物生成H₂，理论总产氢量达8 – 12 mol H₂/mol葡萄糖。

（2）纳米粒子

金属与金属氧化物纳米粒子可显著提升暗发酵产氢效率。其作用机制包括：作为辅酶因子增强酶活性；清除O₂，营造适宜厌氧环境；促进产氢菌属的增殖。研究表明，添加200 mg/L绿色合成铁纳米粒子可使产氢量提升127%；镍纳米粒子亦可使产氢量提升40%。

（3）基因和代谢工程

基因与代谢工程提升暗发酵产氢效率的主要策略包括：过表达产氢关键酶基因，可使产氢量提升39%；敲除竞争性代谢通路基因，使产氢量提升20% – 34%。

4. 结论与展望

暗发酵作为生物制氢的技术路径，在可再生能源与废弃物资源化的交叉领域具备战略价值。然而，暗发酵的产业化仍面临多重挑战。未来研究应聚焦于：

- 1)通过代谢工程与合成生物学手段改造产氢菌株，优化碳/电子流分配；
- 2)开发多级联产工艺，实现能量回收最大化；
- 3)推进中试验证与系统集成，攻克规模化过程中的工程瓶颈；
- 4)暗发酵制氢从实验室走向工业应用，仍需代谢工程、反应器设计与过程集成等多学科的持续突破。

Methane期刊介绍

<https://www.mdpi.com/journal/methane>

主编：Prof. Dr. Patrick Da Costa, Institut d ' Alembert, Sorbonne Universit é , CNRS UMR7190, 2 pl de la Gare de Ceinture, 78210 St Cyr L ' Ecole, France

期刊专注于甲烷及其相关领域的创新研究。期刊涵盖甲烷的生产、储存、转化、利用及环境影响等多个方向，涉及能源科学、环境工程、化学催化、微生物学等交叉学科，旨在为全球学者提供高质量的学术交流平台。本期刊涵盖与甲烷相关的所有研究主题，重点关注但不限于以下领域：甲烷勘探与开采技术，甲烷的化学与物理特性，甲烷及其衍生物的应用，甲烷排放与控制，甲烷代谢过程，天然气水合物（可燃冰），氢能技术，氢燃料开发。Methane于2026年被Scopus和ESC

I收录，第一个CiteScore为5.7。

来源：Methane

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发