二氧化碳高值化化学利用技术的研究进展

曹新悦[1#],高展颜[1#],杨应举[1,2*],苏　毅[4*],黄　俊[1],吴大卫[3*],沈　腾[4],陈　苗[1],刘　晶[1,2]
(1.煤燃烧与低碳利用全国重点实验室(华中科技大学能源与动力工程学院),湖北 武汉 430074;2.深圳华中科技大学研究院,广东 深圳 518000;3.中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司,广东 广州 510663;4.中国船舶集团有限公司第七一一研究所,上海 200000)

摘要:【目的】在碳中和目标背景下,CO_2排放总量及新能源装机容量持续增长,储能需求也随之激增,利用可再生能源驱动CO_2转化为高附加值燃料或化学品,并将其以化学能形式储存,是一种极具前景的大规模长时储能技术。**【方法】**本文综述了基于CO_2高值化利用的储能技术研究进展,包括CO_2催化加氢合成碳基燃料储能、电化学还原CO_2储能及微藻固定CO_2储能,系统分析了各类CO_2高值化利用储能技术的路线及特征,结合催化剂开发、系统集成等关键挑战,分析了不同场景下各类技术的适配性。**【结果】**CO_2高值化利用在技术层面要求产物能量密度高、储能效率优异且兼容现有工业基础设施;经济层面要求原料成本低廉、产物附加值高且具备规模化应用可行性;环境层面要求实现碳闭环循环、全生命周期碳排放低且兼具资源循环价值。甲醇、二甲醚和多碳醇等CO_2高值化利用液体产物具有更高的能量密度,可更高效地将可再生能源以液体燃料的化学能形式储存,且更易在现有基础设施中实现运输与利用;电催化CO_2还原生成的甲酸或甲酸盐储能技术,具有反应条件温和(常温常压)、能耗低且响应迅速的特点,适配中小型储能场景;微藻固定CO_2储能技术通过光合作用实现碳固定与能源生产同步,可利用工业废水及烟道气为原料,兼具环境友好性与资源循环性;上述三种技术路线各有侧重、相互补充,可根据储能规模、场景需求等进行差异化选择,全面覆盖多元化储能需求。**【结论】**总体而言,CO_2高值化利用的储能技术为双碳目标下可再生能源的多元化利用、节能减排及新型储能体系的构建,提供了基于整体视角的关键技术支撑。

关键词:储能技术;二氧化碳利用;热催化还原;电催化还原;光催化还原
中图分类号:TK06　　**文章编号:**1674－8069(2026)04－0529－15
文献标志码:A　　**DOI编号:**10.19944/j.eptep.1674－8069.2026.04.002
[引用本文格式]曹新悦,高展颜,杨应举,等.二氧化碳高值化化学利用技术的研究进展[J].电力科技与环保,2026,42(4):529-543.
CAO Xinyue, GAO Zhanyan, YANG Yingju, et al. Research progress on high-value chemical utilization technology of carbon dioxide[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2026, 42(4):529-543.

Research progress on high-value chemical utilization technology of carbon dioxide

CAO Xinyue[1#], GAO Zhanyan[1#], YANG Yingju[1,2*], SU Yi[4*], HUANG Jun[1], WU Dawei[3*], SHEN Teng[4], CHEN Miao[1], LIU Jing[1,2]
(1. State Key Laboratory of Coal Combustion(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei China;2.Research Institute of Huazhong University of Science and Technology in Shenzhen, Shenzhen 518000, Guangdong China;3.China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong China;4.Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: **[Objective]** In the context of the carbon neutrality target, the continuous growth of total CO_2 emissions and installed capacity of new energy has led to a surge in energy storage demand. It is a highly promising large-scale long-term energy storage technology to utilize renewable energy to drive the conversion of CO_2 into high-value-added fuels or

收稿日期:2026-01-25　　**录用日期:**2026-06-20
Received: 2026-01-25　　**Accepted:** 2026-06-20
基金项目:湖北省中央引导地方科技发展项目(2024CSA088);广东省基础与应用基础研究基金项目(2025A1515011772);深圳市科技计划项目(JCYJ20230807143703008)
#:共同第一作者

chemicals and store them in the form of chemical energy.**[Methods]** This paper reviews the research progress of energy storage technologies based on high-value utilization of CO_2, including energy storage via catalytic hydrogenation of CO_2 to synthesize carbon-based fuels, electrochemical energy storage, and energy storage via microalgal CO_2 fixation. It systematically analyzes the characteristics of various technical routes for energy storage based on high-value CO_2 utilization, addresses key challenges such as catalyst development and system integration, and evaluates the adaptability of various technologies under different scenarios.**[Results]** The high-value utilization of CO_2 requires at the technical level that products have high energy density, excellent energy storage efficiency, and compatibility with existing industrial infrastructure. At the economic level, it demands low raw material costs, high product added value, and feasibility of large-scale application. At the environmental level, it necessitates achieving a closed carbon cycle, low life-cycle carbon emissions, and resource recycling value. Liquid products from the high-value utilization of CO_2, such as methanol, dimethyl ether and polyhydric alcohols, have a higher energy density, enabling more efficient storage as chemical energy in liquid fuels, easier transportation and simpler utilization in existing infrastructure. The energy storage technology via electrocatalytic CO_2 reduction to formic acid or formate is characterized by mild reaction conditions (ambient temperature and pressure), low energy consumption, and rapid response, making it suitable for small and medium-sized energy storage scenarios. The energy storage technology via microalgal CO_2 fixation achieves the synchronization of carbon fixation and energy production through photosynthesis, and can use industrial wastewater and flue gas as raw materials, boasting both environmental friendliness and resource recyclability. The above three technical routes have their own focuses and complement each other, allowing differentiated selection based on energy storage scale, scenario requirements, etc., to fully cover diversified energy storage needs.**[Conclusion]** In general, the energy storage technology based on high-value utilization of CO_2 provides key technical support from an overall perspective for the diversified utilization of renewable energy, energy conservation and emission reduction, and the construction of new energy storage systems under the carbon peaking and carbon neutrality goals.

Key words: energy storage technology; carbon dioxide utilization; thermocatalytic reduction; electrocatalytic reduction; photocatalytic reduction

0 引言

随着世界人口剧增与全球能源需求持续攀升，温室气体排放量激增。过去十年间，受人类活动影响，大气中CO_2浓度持续上升，已引发温室效应、海平面上升等一系列严峻的环境问题[1]。CO_2作为含碳化合物的最终氧化产物，热力学稳定性极高且分子化学能较低，但通过外部能量输入可将其转化为高附加值燃料或化学品，进而将能量以化学能的形式储存于高附加值产物中，这对可再生能源储存和CO_2减排具有重要意义[2]。同时，日益增长的储能需求也为CO_2转化提供了重要应用场景[3]，全球风电、光伏装机量年均增速超20%，其间歇性、波动性特征导致电网消纳压力剧增；2030年全球长时储能规模需求将突破1 000 GW·h，现有储能技术难以满足大容量、跨季节储能需求[3–4]。CO_2高值化利用储能兼具碳循环和能量储存的双重属性，既可以通过绿氢耦合实现CO_2资源化转化，又能以液体和固体产物的形式实现长时储能，弥补传统物理储能的短板，是构建零碳能源体系的关键技术之一[5–6]。借助CO_2及其高值化产物这一能量转化载体，可将富余电能转化为液体或气体燃料等能量形式，实现能量的高效储存与灵活调度，进而完成跨时间、跨空间的能量调配。

CO_2高值化产物作为能量载体的独特优势主要体现在能够实现零碳排放循环：传统化石燃料在使用过程中，通过含碳化合物氧化向大气释放CO_2；而CO_2高值化储能则是将能量以其产物的化学能形式储存起来，在其高值化产物使用时再释放CO_2，理论上可构成闭合的碳循环，实现零碳排放[7]。此外，CO_2来源广泛，常温常压下为气态，便于运输与储存。目前，CO_2高值化储能包括化学储能[5]、电化学储能[8]及生物储能[9]等技术路径。其中，热化学储能和电化学储能因具备产物应用广泛、能量密度高、储存周期长等优势，已成为当前该领域的研究热点[10]。

本文系统综述了多条基于CO_2高值化利用的储能技术路线，重点对比CO_2催化加氢合成碳基燃

料、电催化CO_2转化及微藻固定CO_2三种储能技术的基本特征,结合催化剂设计、系统工艺集成等关键挑战,探讨该领域当前存在的挑战与未来发展方向。

1　CO_2加氢合成碳基燃料的储能技术

CO_2催化加氢仍然是应对全球碳减排及可再生能源储存最具前景的解决方案之一。该过程利用可再生能源(如风电、光伏)电解水制取绿氢,再将绿氢与CCUS捕集的CO_2反应,合成高附加值燃料与化学品[6],包括甲醇、乙醇、二甲醚及高碳醇等含氧化合物,为可持续能源生产提供了一条切实可行的途径[7]。氢气因其质量比能量高(高达33.3 kW·h/kg)且燃烧产物仅为水,被视为理想的清洁能源载体。然而,其极低的体积能量密度导致了显著的储存与运输难题。相比之下,甲醇、二甲醚、乙醇及高碳醇等可作为液态有机氢载体(LOHCs),为氢气的大规模储运提供了一种更安全、成本更可控的替代技术方案[11]。

甲醇作为CO_2加氢最具代表性的产物,因其易储存、可直接作为燃料和化工原料等优势,被广泛研究[12]。CO_2加氢制甲醇的合成反应为:$CO_2+3H_2\rightarrow CH_3OH+H_2O$($\Delta H$=−49.1 kJ/mol),该反应为放热反应,低温高压条件更有利于热力学平衡正向移动[13]。相较于氢气,甲醇具有更高的体积能量密度,可以液体形式高效储存,且便于在现有基础设施中运输与储存[14]。甲醇燃烧或氧化过程中的产物主要为水和CO_2,由此产生的CO_2可再次与绿氢反应生成甲醇,进而形成碳循环,有助于实现系统层面的碳中和[15]。如图1所示,基于绿氢–甲醇的储能生态系统具备灵活适应不同能源需求与地理条件的潜力,可为减少温室气体排放提供切实可行的路径。

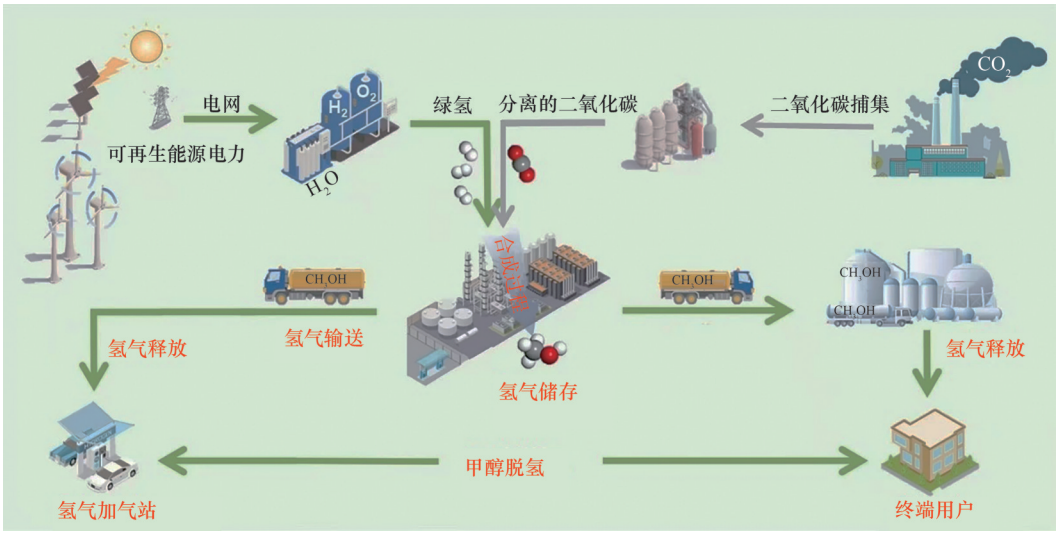


图1　基于CO_2–绿氢合成甲醇的大规模储能系统[11]

Figure 1　Large–scale energy storage system based on CO_2–hydrogen conversion to methanol[11]

传统的CO_2加氢催化剂主要为铜(Cu)、锌(Zn)及其合金等金属催化剂[16]。这类催化剂成本较低、工业应用成熟度高,但其催化性能受限于选择性偏低、稳定性较差,且单程使用寿命仅2 000~4 000 h等问题。反应过程中,中间体物种在催化剂表面积累往往导致其活性在1 000 h内下降15%~30%。此外,此类催化剂通常需要在较高的温度和压力条件下才能有效驱动反应,进一步增加了过程能耗[17]。

工业生产过程中,CO_2催化加氢制甲醇普遍采用$Cu/ZnO/Al_2O_3$催化剂,该体系通过还原态Cu活性位点(Cu^0)与ZnO的协同作用,促进CO_2的吸附与加氢[18]。在典型反应条件下(250~300 ℃、3~10 MPa、H_2/CO_2=3),甲醇选择性可达90%以上[19]。当绿电输入波动时,通过调节电解槽产氢量动态改变H_2/CO_2配比,配比偏差控制在±0.2范围内,同时调节反应器进料流速,保证催化剂床层温度稳定在±5 ℃,可避免温度骤变导致催化剂烧结失活[15, 20]。然而,工业生产中的高温易导致Cu颗粒烧结,引起催化剂逐渐失活,其工业寿命通常为2 000~3 000 h。为突破这一局限,近年来的研究聚焦于新型催化剂的开

发，其中In_2O_3表现出优异的催化活性与稳定性[21]。如图2所示，In_2O_3表面的氧空位在热力学和动力学上均有利于CO_2加氢生成甲酸根物种，并能稳定甲醇生成过程中的关键中间体（如HCOO、H_2COO和H_2CO），克服了这些中间体在Cu(111)表面不稳定的问题。此外，在5.0 MPa、H_2/CO_2=4、体积空速（gas hourly space velocity，GHSV）=21 000 mL/($g_{cat.}$·h)的反应条件下，即便在300 ℃高温下，Ir负载的In_2O_3对甲醇的选择性仍超过70%，在连续运行500 h后活性衰减小于5%，这与传统$Cu/ZnO/Al_2O_3$催化剂形成鲜明对比——后者在高温下选择性较差，且100 h内活性衰减可达20%以上[22]。因此，In_2O_3基材料已成为一种适用于高温条件下的CO_2加氢合成甲醇的高效催化体系[23]。

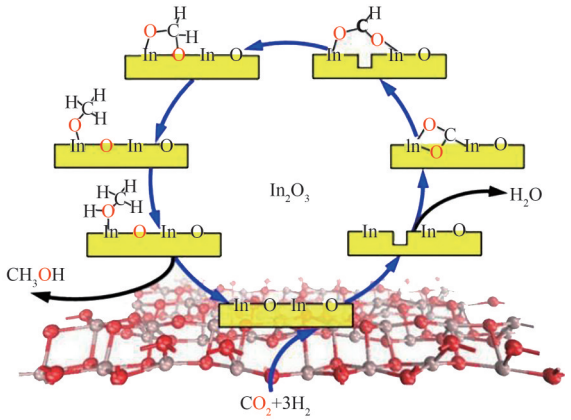


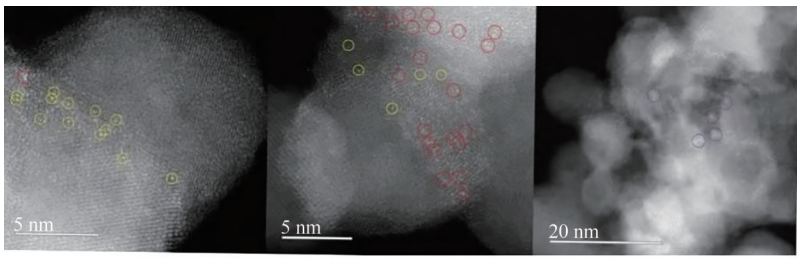
图2　In_2O_3(110)表面CO_2加氢合成甲醇的活性位点[21]

Figure 2　Active oxygen vacancy sites on In_2O_3(110) surface for CO_2 hydrogenation to methanol[21]

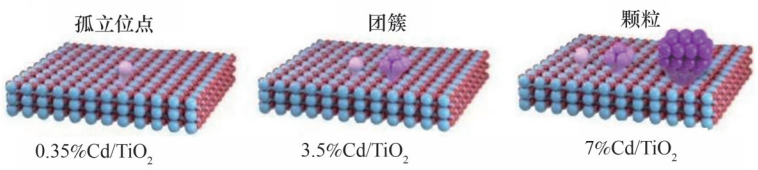
除金属氧化物体系外，硫空位修饰的二维材料也为甲醇合成提供了新的解决方案。与商用$Cu/ZnO/Al_2O_3$催化剂相比，MoS_2催化剂具有更长的使用寿命、更高的催化活性和甲醇选择性[24]。经H_2预处理的二硫化钼纳米片（FL-MoS_2）可在室温下实现CO_2与H_2的活化，而传统$Cu/ZnO/Al_2O_3$催化剂需在80 ℃以上才能达到相近的甲醇产率，并且FL-MoS_2催化剂在180 ℃下连续运行3 000 h仍能保持95%以上的初始活性和选择性[25]。此外，MoS_2催化剂还能有效抑制逆水煤气变换反应（reverse water-gas shift, RWGS）及甲醇过度加氢生成CH_4等副反应[26]。该研究不仅展示了二维材料中面内空位的催化潜力，也为设计高效、稳定的CO_2加氢催化剂提供了新策略[5]。

在非铜基催化剂研究中，Cd/TiO_2体系因其独特的结构设计与界面作用，在CO_2加氢制甲醇中表现出显著的优势[5]。该催化剂采用湿浸渍法制备，通过调节Cd在TiO_2载体上的负载量，可系统调节其催化活性，如图3所示，当Cd负载量为0.35%时，Cd物种以原子级分散形式存在于TiO_2表面，形成孤立活性位点；负载量提升至3.5%时，体系中形成大量的亚纳米Cd簇，但仍保留部分孤立位点，此时催化性能达到最优。与传统铜基催化剂相比，Cd/TiO_2体系表现出明显的优势：传统催化剂因易发生RWGS反应生成大量CO，甲醇选择性通常低于60%，且Cu颗粒在反应中易烧结失活，连续运行1 000 h后活性损失超过30%；而Cd/TiO_2催化剂通过Cd团簇与TiO_2的界面协同作用，不仅将CO选择性控制在10%以下，更将CH_4等烃类副产物抑制在0.7%以下，同时在连续运行1 000 h内活性衰减低于8%，有效克服了传统催化剂选择性低、易失活的缺点。然而，当Cd负载量进一步提高至7%时，纳米级Cd颗粒开始形成，并与Cd团簇和孤立位点共存，Cd物种部分被还原为金属态（Cd^0），导致过度加氢，甲醇选择性下降至58%，CH_4等副产物占比升至3.2%[27]。该研究为开发高性能、高稳定性的非铜基CO_2加氢催化剂提供了重要参考。

除甲醇外，二甲醚（DME）、乙醇等含氧化合物也备受关注，但相关研究相对较少。DME作为一种无毒、无腐蚀性的多功能化合物，不仅可作为清洁替代燃料，还可用作平台化学品、氢载体、燃料添加剂及绿氢衍生的柴油替代品[28]。CO_2加氢合成DME通常遵循“CO_2→甲醇→DME”的两步反应机制，一般采用$Cu/ZnO/Al_2O_3$催化剂催化CO_2合成甲醇，再调控反应温度至240~260 ℃、反应压力至1.5~2.0 MPa，由γ-Al_2O_3催化，控制床层空速为1 000~2 000 h^{-1}，实现甲醇脱水生成DME[29]。该过程中，甲醇合成步骤主要包括直接与间接两种路径：直接路径为CO_2直接加氢制甲醇，流程简短但副产物水含量较高，易导致Cu/ZnO结晶或Al_2O_3亲水失活；间接路径需通过$Fe_2O_3/Cr_2O_3/CuO$催化剂经RWGS反应将CO_2转化为合成气（CO、H_2），再合成甲醇，从而减少水生成。在此基础上，将直接或间接路径优化为两级反应系统，即将甲醇合成反应器分为两部分，第一部分的输出经分离器分离甲醇和



(a) 以上3张图像从左到右依次为0.35%Cd/TiO_2、3.5%Cd/TiO_2、7%Cd/TiO_2催化剂的球差校正扫描透射电子显微镜-高角环形暗场图像。其中，黄色圆圈标记孤立Cd位点，红色圆圈标记Cd团簇，紫色圆圈标记Cd颗粒



(b) 0.35%Cd/TiO_2、3.5%Cd/TiO_2、7%Cd/TiO_2催化剂的结构示意图

图3　Cd/TiO_2结构表征[27]

Figure 3　Structural characterization of Cd/TiO_2[27]

水后，剩余气流进入第二部分继续反应，其中改进后的间接路径两段工艺能显著提高CO_2转化率，成为传统工艺中最具优势的选择[30]。图4为4种DME生产路径的性能对比。

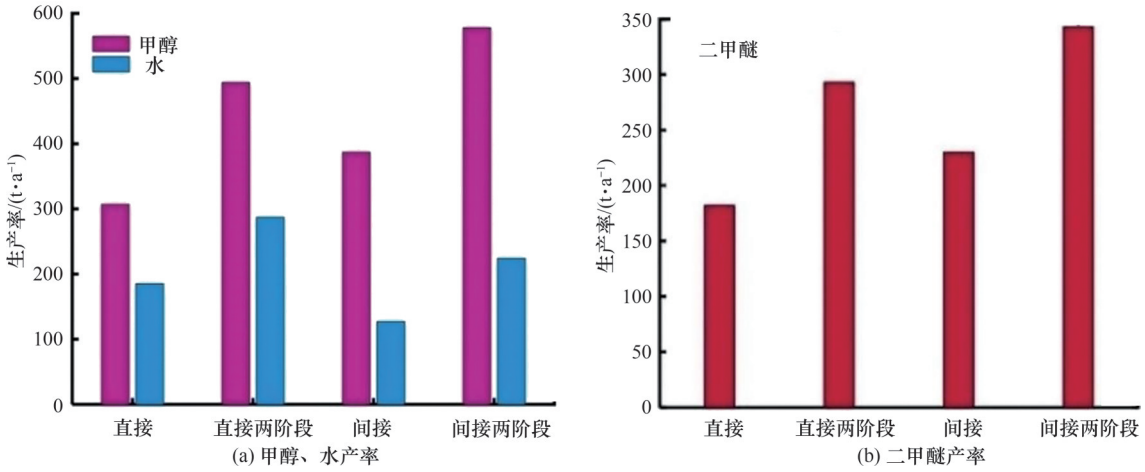


图4　4种DME生产路径的性能对比[30]

Figure 4　Performance comparison of four DME production pathways[30]

此外，新型吸附强化直接二甲醚合成(SEDMES)路径利用LTA沸石吸附剂再生温度(180~200 ℃)与再生频率(4~6 h/次)的特性，通过原位吸附副产物水，可打破反应热力学平衡限制，使CO_2可直接作为原料参与反应，该技术在未对系统进行额外优化的条件下，即可实现超过80%的CO_2单程转化率与70%以上的DME选择性，大幅降低下游分离与循环能耗，尤其适配高浓度CO_2进料场景[31]。总体而言，SEDMES在碳转化效率方面表现最优，传统间接两段路径因技术成熟，更适配当前规模化应用，其副产物水对催化剂的影响可通过两段分水或SEDMES原位吸附副产物水的方式解决。未来需重点优化SEDMES吸附剂的工作容量与再生性能，并降低吸附剂成本，以推动其规模化工业化应用。

乙醇在全球多个国家(如中国、美国、加拿大和巴西等)被广泛用作燃料添加剂,同时还可作为多种化学产品的溶剂、试剂和原料。随着全球人口的持续增长、能源需求的提升及化工产业的发展,预计未来对乙醇的需求将大幅增长[32]。催化CO_2加氢合成乙醇需同时实现CO_2活化、碳链增长与加氢等多个步骤,是当前该领域研究的难点之一。均相催化体系凭借其分子水平的活性中心调控优势,在温和条件下表现出较高的乙醇选择性,其中Ru-Co双金属体系[27]是当前研究最为成熟、性能最突出的催化体系之一。该体系最早由Watanabe等[27]于1994年报道,以$Ru_3(CO)_{12}$-KI为助催化剂、$Co_2(CO)_8$为主催化剂,在N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)溶剂中,于200 ℃、11.8 MPa、H_2/CO_2=5的反应条件下,该体系可形成Ru-Co混合金属簇,将乙醇产率提升至32%,其反应过程为$CO_2+3H_2\xrightarrow{Ru}CO\xrightarrow{Ru}CH_3OH\xrightarrow{Co}CH_3CH_2OH$。后续研究者对该体系进行了优化,开发出多种高效反应体系。例如,通过Ru-Co双金属协同效应、LiI等助催化剂与溶剂的精准适配,系统性提升了乙醇的选择性与产率,推动了均相催化体系在CO_2制乙醇方向的性能突破。

在多相催化CO_2加氢制乙醇领域,贵金属催化剂因其优异的C—C偶联能力而成为研究热点。Rh基催化剂通过添加Li、Fe等助剂,并选用TiO_2、CeO_2等载体调控活性位点,可显著提升乙醇的选择性。例如,在RhFeLi/TiO_2催化剂中,Li通过电子效应增强Rh对CO的桥式吸附能力,Fe促进CO解离为CH_x中间体,TiO_2载体既稳定了金属颗粒,又通过其表面羟基直接参与了关键中间体的活化,多组分协同效应共同驱动C—C键的生成,从而实现CO_2高选择性转化为乙醇[33]。此外,Pd基催化剂通过合金化调控活性位点的电子态,从而精确调控产物的选择性:Pd基催化剂的双原子或纳米颗粒结构更利于乙醇生成,而单原子位点则倾向于生成甲醇。Pd_2Cu NPs/P25催化剂在200 ℃、3.2 MPa下对乙醇的选择性达92%,且稳定性最优;0.1 wt% Pd/Fe_3O_4单原子催化剂在300 ℃、CO_2/H_2=1∶4的条件下,对乙醇的选择性为97%[34]。CeO_2负载的Pd_2二聚体(Pd_2O_4构型)在240 ℃、3 MPa、GHSV=3 000 mL/($g_{cat.}$·h)的条件下,乙醇选择性高达99.2%,时空产率达45.6 $gC_2H_5OH\cdot(g_{Pd}\cdot h)^{-1}$;$Pd_2Ce$@Si双原子催化剂在240 ℃、3 MPa下,对乙醇的选择性为97.8%;而单原子Pd_1Ce@Si催化剂在相同条件下主要生成甲醇,其选择性可达90.8%,乙醇选择性<5%。这些反应体系遵循类似的核心反应路径[27],即CO_2先加氢活化为COOH中间体,随后解离为CO,并进一步加氢解离为CH_x,最终通过C—C偶联与加氢步骤生成乙醇。

非贵金属催化体系因成本低、储量丰富,表现出良好的工业化应用前景。Co基催化剂以Co-CoO_x(Co-$Co^{\delta+}$)双活性相为核心,通过Ga调控、Ni合金化优化活性相结构,反应主要遵循CO介导机制[35]。铜基催化剂依赖Cu^0/Cu^+活性位点,经EDTA/TEA改性、碱金属Cs辅助修饰或沸石嵌入,适配于甲醇或甲酸酯介导的反应路径。Mo基催化剂需构建*M*/Mo_2C(*M*=Co/Fe)协同位点,通过K助剂促进、Co/Fe掺杂调控协同位点结构,同样以CO介导机制实现CO_2高效转化。当前,研究者通过助剂修饰、载体优化及多组分复合等策略,已显著提升非贵金属体系的性能,但该体系仍面临CO_2转化率普遍低于40%、Co基催化剂中Co^{2+}易还原为Co^0导致催化剂选择性下降等难题。尽管如此,非贵金属催化体系成本与性能的平衡优势,已为CO_2利用技术的工业化应用提供了关键保障;未来通过活性位点的精准调控与工艺优化,有望进一步提升CO_2高值化利用的能量转化效率与长期稳定性[32]。

CO_2加氢制乙醇作为碳循环和能源储存的关键技术之一,其核心突破是通过催化剂设计实现C—C键形成的精准调控。无论是均相催化的分子水平协同效应,还是多相催化的活性位点工程,均为提升乙醇的选择性和产率提供了多元化路径。未来研究需结合原位表征与理论计算,深入揭示在CO_2加氢制乙醇过程中C—C偶联的动态机制,并通过材料创新与工艺优化,突破催化剂成本与寿命的瓶颈限制,推动该技术从实验室走向规模化、工业化,为碳中和目标下燃料与化学品的可持续合成提供可行方案。

多碳醇(丙醇、丁醇等碳链长度大于乙醇的醇类)在大宗化学品和燃料领域具有重要价值,其合成本质上是乙醇合成的碳链延伸,关键在于实现连续的C—C偶联;其反应过程需协同调控CO_2活化、中间体(如CO^*、CH_x^*)生成与碳链增长,可通过CO介导、甲氧基介导或甲酸酯介导等路径。铜基和氧化锌基催化剂在甲醇合成中已广泛应用,进一步优化

后表现出高效合成多碳醇的潜力。Fe基催化剂中的Fe_5C_2相能稳定$HCOO^*$中间体,有效降低$HCOO^*$中间体与CH_2^*的偶联能垒,从而促进碳链增长。串联催化体系可生成CO和CH_x^*物种,促进CO插入反应,形成C_2^+中间体,为多碳醇的合成提供了可行路径[28]。

CO_2催化加氢合成碳基燃料的储能系统为"绿电–绿氢–CO_2转化–产物储运–能量释放"的全链条集成体系,核心依托可再生能源电解水制绿氢,与捕集的CO_2耦合实现催化合成过程,最终以甲醇、二甲醚、乙醇等产物完成能量存储,典型系统为基于CO_2–绿氢的大规模甲醇合成储能系统[11],在此基础上实现模块化与工业化深度集成:首先是前端耦合CCUS与绿氢制备模块,针对电厂烟道气、化工尾气等CO_2气源,匹配膜分离、胺法等捕集技术,绿氢制备模块优先采用PEM电解槽,适配风电、光伏等波动性电力输入特性[14-15];接着中端集成催化合成与产物分离模块,采用固定床、浆态床反应器与精馏分离单元联动方式,实现产物的连续化生产[13, 18];最后是后端耦合产物储运与能量释放模块,甲醇、二甲醚等产物可直接接入现有燃油、燃气基础设施,也可通过脱氢制氢、直接燃烧实现能量释放,形成从储能到供能的闭环[11-12]。

目前工业示范层面,国内已建成千吨级CO_2加氢制甲醇示范装置(如宁夏宝丰、上海华谊),采用"绿电电解水–CO_2捕集–催化合成"的集成模式,CO_2单程转化率达30%以上,甲醇选择性超过95%,系统整体能量转化效率约28%[20],为规模化系统集成提供了工程参考。

2　电催化CO_2还原的储能技术

电催化CO_2还原生成甲酸(HCOOH)或甲酸盐($HCOO^-$)是兼具碳循环和能量储存的关键路径[36]。甲酸盐因其氢密度高、常温稳定、无毒且易运输的特性,可作为高效的氢载体或直接用于燃料电池发电[37]。在基于CO_2利用的储能技术体系中,电催化CO_2还原制甲酸/甲酸盐($HCOOH/HCOO^-$)因其仅需2个电子转移的简单反应路径、较高的经济可行性以及良好的储能适配性,已成为CO_2资源化利用的重要方向[38]。基于CO_2电催化还原储能技术(将能量储存于高值化产物)的路线如图5所示。

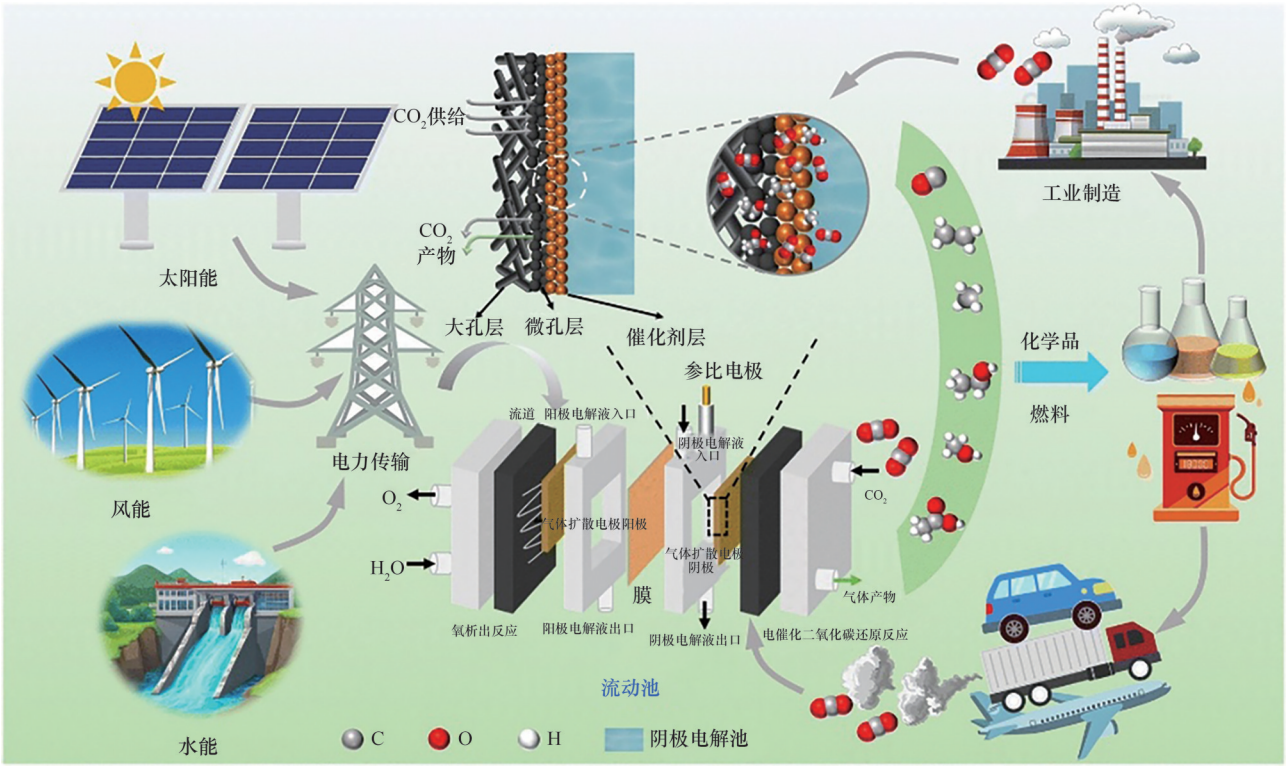


图5　电催化CO_2转化为燃料及高附加值化学品的储能技术工艺[40]

Figure 5　Electrocatalytic CO_2 conversion to fuels and highly value–added chemicals for energy storage[40]

如图6所示，电催化二氧化碳还原(CO_2RR)可生成包括甲酸、甲醇、乙烯在内的多种产物，为储能介质提供了较宽的选择范围。其中，生成甲酸的路径因其高选择性和高能量效率而备受关注，其反应机理如图6(b)(c)所示。甲酸主要通过三种路径合成，其一为*COOH介导路径，如图6(b)所示，CO_2先在催化剂表面吸附形成$^*CO_2$，进而转化为与催化剂键合的$^*CO_2^-$中间体，并结合质子转化为*COOH，随后通过质子耦合电子转移(proton coupled electron transfer, PCET)生成HCOOH、通过单电子转移生成$HCOO^-$，但该路径中*COOH中间体更倾向于分解为CO进而生成其他产物。第二个反应路径为当前公认的反应路径，即图6(c)所示的双齿*OCHO路径，CO_2通过氧原子与电极表面结合，形成*OCHO中间体，再经PCET或单电子转移生成HCOOH或$HCOO^-$(目标产物)。第三种反应路径为氢化物介导路径，在外加电场作用下，催化剂氧化态发生变化，促使其向水溶液中的质子转移2个电子，形成$^*H^-$中间体，$^*H^-$具有高亲核性，可促使CO_2插入金属–氢键形成*OOCH或*OCOH中间体，最后通过电子转移或PCET生成$HCOO^-$[39]。

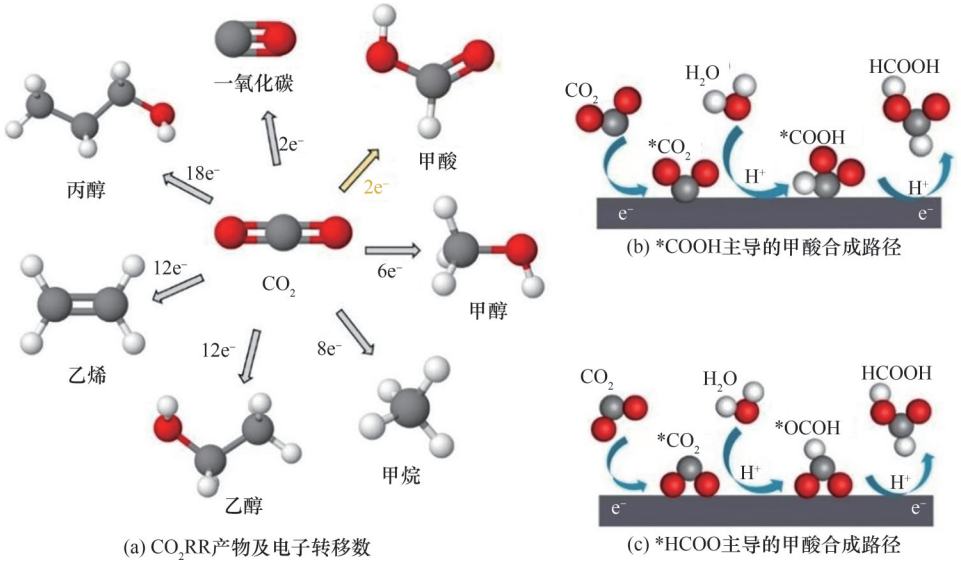


图6　CO_2RR的反应机理[39]

Figure 6　Reaction pathways of formic acid production via CO_2RR[39]

反应中间体在电极表面的相对结合强度是决定CO_2还原活性与选择性的关键——双齿*OCHO中间体更有利于HCOOH的生成，当其在催化剂表面具有适宜的结合能时，反应可高效进行。锡(Sn)、铋(Bi)、铟(In)、铅(Pb)等高选择性金属因其独特的亲氧性，热力学上更倾向于吸附*OCHO中间体，同时它们与*H的结合较弱，能有效抑制竞争性析氢反应(HER)[37]。其中，Bi基催化剂受到广泛关注，2D Bi纳米片(单层/双层)凭借丰富的边缘位点，可实现99%的甲酸(HCOOH)法拉第效率(faraday efficiency, FE)，且能保持75 h的稳定性。通过BiO*X*(*X*=Cl/Br/I)、Bi_2S_3等前驱体原位还原，可使Bi基催化剂定向暴露高活性晶面，当电流密度达200 mA/cm²时，FE仍超过90%。

合金化与杂原子掺杂策略能够进一步提升催化性能，如图7所示，$Bi_{0.1}Sn$合金在聚四氟乙烯(PTFE)基底上可实现>95%的法拉第效率、100 mA/cm²的电流密度及长达100天的稳定运行。此外，单原子Pb_1Cu合金催化剂通过调控Cu活性位点的反应路径，可将法拉第效率提升至96%，电流密度达800 mA/cm²。S修饰的Sn催化剂、N掺杂Bi_2O_3–CNT复合材料则通过调控电子结构，增强$^*CO_2$的活化能力，其法拉第效率分别达到93%和97%[39]。

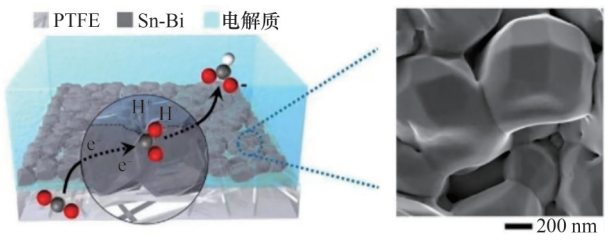


图7　合金电催化剂的合成与表征[41]

Figure 7　Synthesis and characterization of alloy electrocatalysts[41]

电催化还原CO_2的反应器正向着规模化与高产物纯度方向发展[42],图8所示为用于电催化CO_2还原制甲酸的多种反应器,其中膜电极组件(MEA)和多孔固体电解质(PSE)反应器,相较于H型电解池和流通池表现出更优的性能[39]。MEA采用零间隙结构,能显著降低欧姆电阻,从而适配工业级高电流密度运行需求。PSE反应器采用阴离子/阳离子交换膜(AEM/CEM)的双膜设计,可使Bi_2O_3催化剂在200 mA/cm^{2}下实现91.3%的法拉第效率并稳定运行1 000 h,甲酸浓度可达10.94 wt%,该设计有效解决了传统体系中产物与电解质分离的难题。此外,甲酸本身具备优异的储氢性能,能很好地适配可再生能源的波动型储能需求。但其工业化应用仍面临催化剂长期稳定性不足、CO_2利用率有待提升以及反应器盐沉积抑制困难等挑战,未来需要通过催化剂、反应器设计与系统运行之间的协同优化,推动其发展成为关键的储能技术之一[43]。

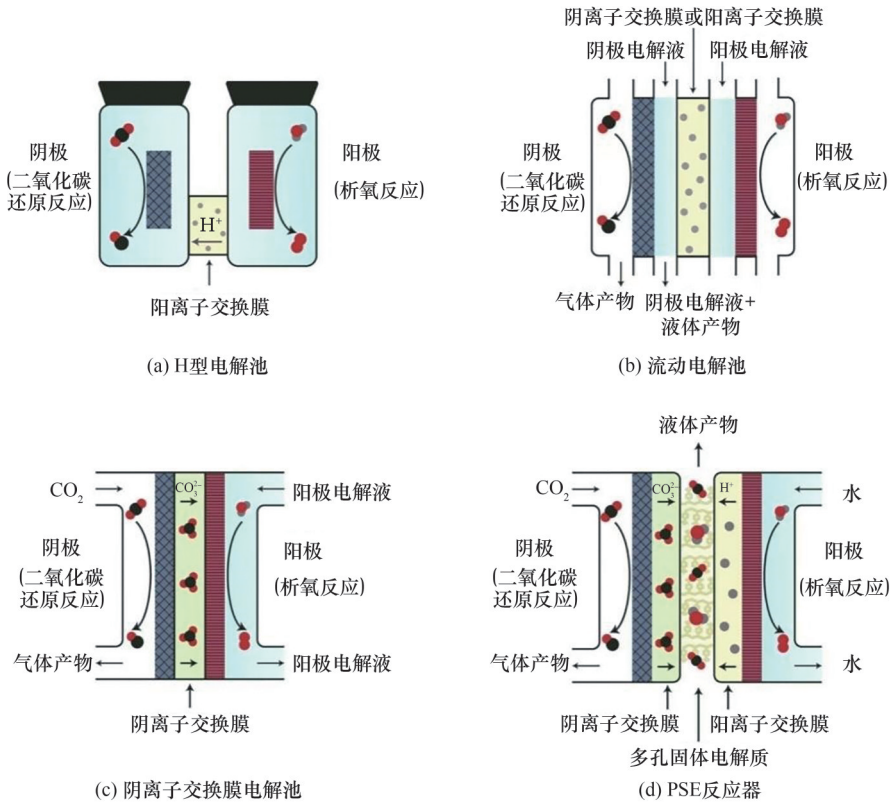


图8　CO_2电催化还原制甲酸的不同电解池的结构示意图[39]

Figure 8　Schematic diagrams of different electrolyzers for electrocatalytic CO_2 reduction to formic acid[39]

3　光驱动微藻固定CO_2的储能技术

微藻是一类单细胞或简单多细胞的光合微生物,主要包括蓝藻、绿藻和硅藻等类群,广泛分布于淡水、海洋及半咸水等生态系统中。尽管其生物量不到高等植物的1%,但却为地球贡献了超过50%的初级生产力和氧气,是地球上光合效率最高的生物类群。它们能够利用光能固定CO_2,并通过多种代谢途径高效合成蛋白质、核酸、脂质等生物大分子及各种次级代谢产物,从而实现从CO_2到多元高值产品、从太阳能到微藻光合作用产物的转化与储存[44],如图9所示。

微藻主要通过光合作用和CO_2浓缩机制(CCMs)协同实现CO_2的高效固定,其中光合作用包括光反应和暗反应(卡尔文循环)2个阶段[9]。如图10所示,在光反应阶段,真核微藻借助叶绿体类囊体膜上的光合系统(PSⅠ、PSⅡ)捕获光能,驱动水分解产生氧气,同时生成ATP与NADPH,完成光能向化学能的初步转化;在暗反应阶段,核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)催化CO_2与核酮糖-1,5-二磷酸(RuBP)结合,生成3-磷酸甘油酸,再利用ATP和NADPH将其转化为葡萄糖等有机物,

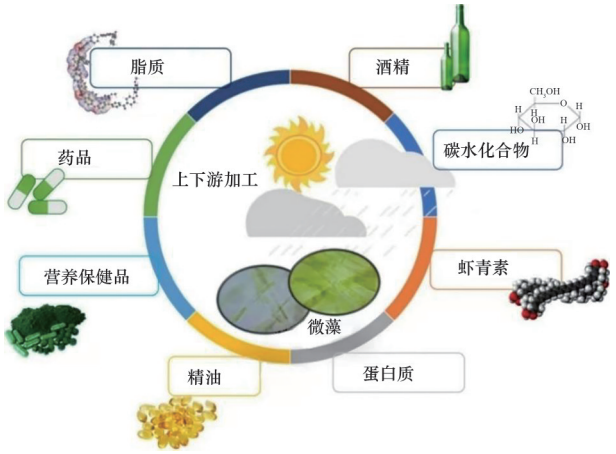


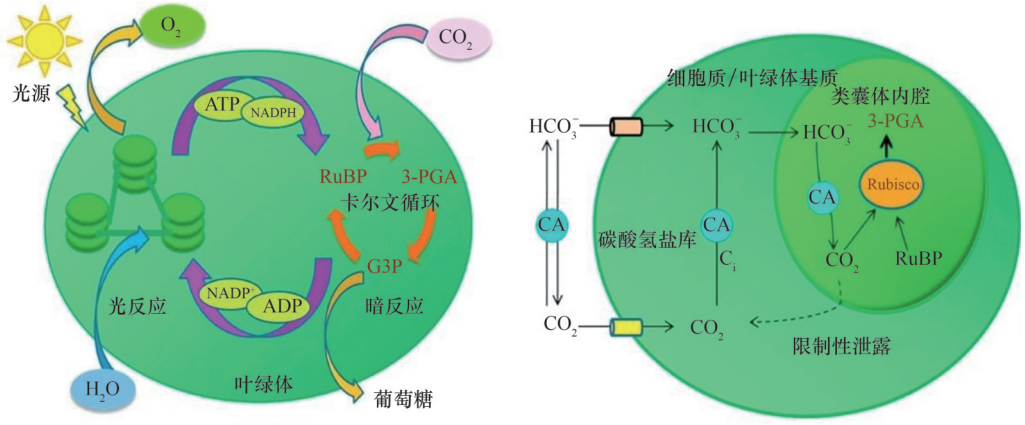
图9　微藻的多元高值产品合成[45]

Figure 9　Multi-component high-value product conversion of microalgae[45]

最终合成脂质或碳水化合物等储能物质。

由于Rubisco对CO_2的亲和力较低，微藻进一步通过CCMs提升固碳效率，即通过主动转运蛋白吸收HCO_3^-，再经碳酸酐酶（CAs）催化转化为CO_2，从而在RuBisco周围形成局部高浓度CO_2环境，抑制光呼吸损耗，可使CO_2固定效率提升30%~50%。此外，微藻会根据环境条件动态调整碳代谢分配，在适宜条件下（25~35 ℃、350 μmol/(m²·s)光照）碳优先分配至碳水化合物，而在逆境条件下（高温>35 ℃、高光照650 μmol/(m²·s)）则向脂质转移，这为后续能源转化奠定了物质基础。

微藻的CO_2固定能力和储能物质的产量受温度、光环境、pH、CO_2浓度等多重因素的协同调控[9]。多数微藻在25~35 ℃范围内Rubisco活性最高，微小细囊藻在35 ℃时CO_2固定率可达370 mg/(L·d)，而在低温（15 ℃）条件下，其光合作用会受阻，固定率降至160 mg/(L·d)；普通小球藻最适生长温度为28~30 ℃，该区间内生物质产量可达14.3 g/L，综合适应性强[46]；裂殖壶菌最适培养温度为25~28 ℃，不耐高温，适宜温度下脂质含量高达50%~77%，是高储能优势菌株[47]。光照需与光合作用需求匹配，以350 μmol/(m²·s)为工程化最优光强，低光强（50 μmol/(m²·s)）会显著降低生物量，微小细囊藻耐低光性差，普通小球藻对光强波动适应性更强[48]。pH在7.0~9.0时，HCO_3^-占比最高，有利于CCMs的高效进行，通过添加适量$CaCO_3$调节pH可使普通小球藻的CO_2固定率提升20%。CO_2浓度以工业烟道气中典型范围（1%~15%）最为适宜，6% CO_2为三种菌株的最优固碳浓度[49]，其中普通小球藻在CO_2浓度为6%的条件下生物质产量可达14.3 gL^{-1}，浓度超过20%则会导致培养基酸化。不同培养体系通过气液传质和环境可控性显著放大了菌株性能差异，开放跑道池CO_2利用率60%~70%，生物质产率15~20 g/(m²·d)，运行成本低但占地面积大；封闭管式PBR的CO_2利用率85%~95%，生物质产率30~40 g/(m²·d)，占地面积仅为开放池的1/4，适配高浓度CO_2气源与精细化高值培养[50]。此外，烟道气中的杂质也会对微藻产生影响，低浓度氮氧化物（NO_x）可作为氮源促进生长，高浓度NO_x则会损伤光合系统。SO_x水解产生H^+和SO_4^{2-}，可使pH降至2.6并抑制CAs活性，多数微藻在SO_x>60 ppm时生长受阻，需进行预处理或选用耐受菌株。痕量汞（Hg）即可降低叶绿素



(a) 光合作用　　(b) CO_2浓缩

图10　微藻固定CO_2的机制[9]

Figure 10　Mechanism of microalgal CO_2 fixation [9]

含量,抑制光合效率。在培养策略上,可采用梯度递增温度或光强的驯化方式,提升微藻的耐逆性。

微藻凭借其高效的光合固碳能力与丰富的代谢潜能,可产出多种高附加值产物[45]。在脂质方面,裂殖壶菌可将CO_2转化为占细胞干重50%~77%的脂质,微拟球藻也能将CO_2转化为自身干重31%~68%的脂质,这些脂质不仅是第三代生物柴油的核心原料,还可通过直接酯交换、超临界CO_2萃取等高效提取技术转化为液态燃料,直接兼容现有燃油供应体系。在多糖类产物方面,微藻可将固定的碳转化为多糖,经酸或酶水解为葡萄糖后,可通过发酵生成生物乙醇,也可在800~1 000 ℃下气化制备合成气,或在200~300 ℃下烘焙得到生物炭,全面覆盖液态、气态、固态三类储能形态。此外,类胡萝卜素也是微藻的主要产物,具备较高的经济价值和营养保健价值。微藻通过将CO_2转化为可长期储存、多场景应用的清洁能源与化学品,不仅实现了温室气体的资源化利用,也为低碳储能提供了可持续路径[51]。

未来可通过基因工程改良菌株,优化CCMs,增强耐逆性,进一步提升CO_2固定与储能物质的积累效率,同时创新培养系统,结合AI技术动态调控光照、温度、CO_2供应等相关参数,系统提升经济性,并探索微藻生物燃料与氢能储存、电池储能等技术的新型耦合模式,推动该技术从实验室走向规模化应用,为CO_2资源化与可再生能源储存提供集成解决方案[9]。

4 不同CO_2高值化利用的储能技术对比

CO_2加氢合成碳基燃料储能、电化学储能以及微藻固定CO_2储能,这3条基于CO_2利用的储能技术路线各不相同又彼此互补。CO_2加氢制取的碳基燃料具有储能密度高、工业成熟度高的优势,适用于大容量、长周期的储能场景,是解决可再生能源储存问题的重要途径。电催化CO_2还原可在常温常压下反应,能耗较低、响应迅速,尤其适合中小型储能场景。微藻固定CO_2则通过光合作用同步实现碳固定与能源生产,并能利用工业废水、烟道气等作为原料,兼具环境效益与资源循环特色。这三条路线从规模、场景到效益层层递进、相互支撑,在推动CO_2资源化利用的同时,也共同构建了覆盖多元场景的储能体系。

GW级跨季节长时储能的大型电网,适宜采用CO_2加氢合成碳基燃料储能的方式,适配风电及光伏基地的大容量绿电消纳,产物可通过油气管网储运,实现跨区域、跨季节能量调配,典型应用场景为西北风光基地耦合煤化工CO_2气源的储能系统[4, 52]。MW级就地消纳工业园区分布式储能体系采用电化学储能和微藻固定CO_2储能协同结合的方式,电催化利用园区风电及光伏的分布式绿电,生成的甲酸供园区化工生产使用;微藻利用园区烟道气或废水,实现固碳与生物质储能,典型应用场景为化工园区、电厂园区的储能–固碳耦合系统[53]。kW–MW级独立供能的偏远地区离网储能系统采用微藻固定CO_2储能的方式,利用当地光照资源,无需复杂设备,产物可直接供能,典型应用场景为牧区、海岛的离网储能系统[44]。100 MW级联产供能化工–电力耦合储能系统采用CO_2加氢合成碳基燃料储能和电化学储能串联的方式,二甲醚等作为燃料供电力生产,甲酸作为化工原料供园区生产,实现储能–生产一体化,典型应用场景为炼化园区、煤化工园区的储能–生产耦合系统[13, 30]。

CO_2加氢储能、电催化CO_2还原储能与微藻固定CO_2储能,均是围绕CO_2高值化利用的储能技术,三者原理不同,最终形成了差异化的应用定位。CO_2加氢技术与现有工业体系兼容度高,适合大规模处理工业废气,但其发展受绿氢供应与高温高压过程能耗的限制。电催化CO_2储能可在常温常压下进行,并与风电、光伏等间歇性能源直接耦合,然而当前面临电力成本占比高、催化剂寿命短等瓶颈[54]。微藻固定CO_2储能具有生物固碳的绿色前景和产物多元的经济潜力,但其规模化应用受限于占地面积大、微藻采收与加工成本高等问题。如表1所示,三种储能技术路径各有侧重、互为补充,可以根据不同资源条件和应用场景进行差异化选择,共同为实现碳中和目标提供多元化的技术支撑。

5 结论与挑战

本文系统梳理了基于CO_2高值化利用的多种储能技术,重点聚焦CO_2加氢合成碳基燃料、电催化CO_2还原储能及微藻固定CO_2储能3大技术路线,从催化机理、反应体系与系统特性等角度进行分析与比较,3大技术路线均实现CO_2资源化与能量储存的协同,但其性能与场景适配性存在差异。本文突破了单一碳利用或单一储能的研究视角,构建了多种技术视角下碳减排、储能和高值化利用相结合的分

表1　3种CO_2高值化利用的储能技术对比

Table 1　Comparison of three energy storage technologies based on value-added CO_2 utilization

储能技术	核心产物	能量密度/($MJ\cdot kg^{-1}$)[11, 38, 45]	CO_2转化效率/%[19, 39, 43]	反应条件	规模化成本/(元·t^{-1})[13, 52, 53]	储能周期[3, 5, 9]	核心优势	核心劣势
CO_2加氢储能	甲醇 二甲醚	甲醇22.7 二甲醚28.4	30~80	中高温 中高压	甲醇2 100~2 800	数月—数年	能量密度高； 兼容现有基建	依赖绿氢； 系统能耗较高
电催化CO_2还原储能	甲酸 甲酸盐	甲酸17.5 甲酸盐10.2	80~95	常温常压	甲酸2 800~3 500	数天—数月	反应条件温和； 适配绿电直耦	催化剂寿命短； 规模化难
微藻固定CO_2储能	脂质 生物炭	脂质30~40 生物炭20~25	60~95	常温常压	脂质5 000~6 300	数月—数年	环境友好； 资源循环性强	占地面积大； 采收成本高

注：CO_2转化效率中热催化为总转化效率、电催化为法拉第效率、微藻为光合固碳效率；规模化成本包含原料、设备与运行成本。

析框架，同时结合实际技术应用，提出差异化技术选型与组合方案的思考，为工业实际应用提供参考。同时为双碳目标下可再生能源的间歇性消纳、碳资源循环利用及新型储能体系构建提供了整体视角与技术参考。CO_2高值化利用合成的甲醇和二甲醚等液体产物具有更高的能量密度，可有效将可再生能源以液体燃料的化学能形式储存，这类液体燃料更容易在现有基础设施中运输和利用。3种储能技术既通过CO_2资源化利用助力碳减排，也能依托各自的场景适配性应对多元储能需求，同时，各技术路线在催化剂创新与系统集成方面的持续突破，为技术的进一步升级奠定了基础。

然而，基于CO_2利用的储能技术仍面临一系列共性问题与挑战，包括催化剂活性、选择性与稳定性的协同提升，全生命周期隐含碳排放的控制，以及与波动性可再生能源的高效耦合等问题。未来需着力提升CO_2高值化利用系统效率，推动与可再生能源系统的集成优化以及多技术路径的耦合创新，从而推动该领域从实验室走向规模化应用，最终为构建可持续的新型能源系统、实现全球碳减排目标提供核心技术支撑。

1）能量转化与储存材料开发：催化剂是CO_2转化与能量储存的关键，但现有技术难以同步满足高活性、高选择性与长期稳定性的需求。在CO_2加氢技术中，工业烟道气所含的S、Cl杂质易导致催化剂中毒失活；同时现有催化剂存在性能和成本的矛盾，高效催化剂（如In、Ru等稀缺贵金属体系）成本高昂、经济性差，而非贵金属催化剂虽成本较低，却普遍存在产物收率偏低的问题。在电催化制甲酸路径中，Sn基催化剂虽能实现较高的法拉第效率，却因颗粒易团聚而在运行30 h后性能显著下降。微藻固定CO_2的储能技术所依赖的Rubisco酶对CO_2亲和力低，且在高温、低光等非理想条件下活性大幅度下降[55]。未来需重点开发高效低成本催化剂、对Sn基催化剂进行介孔包覆以提升寿命、或通过基因工程改造微藻Rubisco酶增强耐逆性，从而逐步突破材料层面的制约。

2）储能反应运行系统提升：CO_2高值化利用的储能技术在实际落地过程中，常受隐含碳排放与系统低效等问题的制约。例如，微藻开放培养系统中CO_2逃逸率可达15%~20%，若微藻生物质干燥、甲酸精馏提纯等环节依赖化石能源供能，将使全生命周期碳排放较理论值增加30%以上，导致技术从碳减排手段沦为隐性碳源。为应对上述问题，应优先耦合风电、光伏等绿电以降低制氢的间接排放，采用封闭型光生物反应器（PBR）降低CO_2逃逸率，同时利用工艺余热或绿电驱动干燥、精馏等环节，从而有效控制全过程的隐含碳排放。

3）可再生能源集成与多技术路径耦合：CO_2高值化利用储能技术与可再生能源的融合不足，进一步制约反应的经济性与运行稳定性。风电、光伏等波动性电源与CO_2转化反应器的响应速度不匹配，易造成资源浪费。同时，CO_2排放源与可再生能源基地的空间分布错位增加了H_2运输难度与成本，导致技术经济性波动，难以实现稳定规模化应用[4]。为此，可采用CO_2催化加氢与风光绿氢基地就近耦合的方式实现规模化落地，引入储氢罐作为缓冲，平抑绿电波动，保证反应器连续运行；电催化CO_2还原与园区分布式绿电耦合，实现园区绿电的就地消纳和调峰；微藻固定CO_2与电厂耦合，电厂烟道气经除尘后通

入微藻培养体系,同时微藻生物质也可作为电厂燃料补充。另外,结合实际情况因地制宜采用三条技术路径相互耦合,在创新视角下提升整体经济效益,构建可持续的新型能源系统。高浓度CO_2气源的化工园区可利用电催化CO_2还原制CO作为催化加氢的原料,二者的串联耦合弥补直接加氢CO_2转化率低的问题,能够提升整体CO_2转化效率;工业园区采用同一套CO_2捕集装置,实现CO_2催化加氢制得二甲醚供热供电、电催化制得甲酸供园区化工生产的并联耦合,保证CO_2的分质高值化利用;利用微藻在低浓度CO_2或废水环境中制得的生物质,经气化制合成气,可作为CO_2催化加氢的补充原料,实现跨能级的耦合,适配于无高浓度CO_2的农业园区。

参考文献:

[1] JACOBSON M Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security[J]. Energy& Environmental Science, 2009, 2(2): 148–173.

[2] 罗海中,吴大卫,范永春,等. 碳中和背景下CCUS技术发展及广东离岸封存潜力评估[J]. 南方能源建设,2023,10(6):1–13.
LUO Haizhong, WU Dawei, FAN Yongchun, et al. Development of CCUS technology in the context of carbon neutrality and assessment of the potential for offshore storage in Guangdong Province[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(6): 1–13.

[3] KUMAR R, LEE D, AGBULUT U, et al. Different energy storage techniques: Recent advancements, applications, limitations, and efficient utilization of sustainable energy[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, 149(5):1895–1933.

[4] DANISH M S S, UEDA S, FURUKAKOI M, et al. Techno–economic modeling of diverse renewable energy sources integration: Achieving net–zero CO_2 emissions[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2024, 19(7): 1168–1182.

[5] BORETTI A. Carbon dioxide hydrogenation for sustainable energy storage [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 58:1386–1395.

[6] GRAVES C, EBBESEN S D, MOGENSEN M, et al. Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO_2 and H_2O with renewable or nuclear energy[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1):1–23.

[7] 骆攀,谈文杰,胡恩祥,等. 二氧化碳催化加氢合成燃料的微通道反应器[J]. 南方能源建设,2024, 11(4):16–22.
LUO Pan, TAN Wwenjie, HU Enxiang, et al. Microchannel reactor for hydrocarbon fuel synthesis from CO_2 catalytic hydrogenation[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(4): 16–22.

[8] MA Y Q, XU R, WU X, et al. Progress in catalysts for formic acid production by electrochemical reduction of carbon dioxide[J]. Topics in Current Chemistry, 2024, 383(1): 2.

[9] UDAYPAL, GOSWAMI R K, MEHARIYA S, et al. Advances in microalgae–based carbon sequestration: Current status and future perspectives[J]. Environmental Research, 2024, 249: 118397.

[10] 谢停,刘晶,杨应举. 铁基钙钛矿光热催化CO_2还原性能研究[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(11):3814–3819.
XIE Ting, LIU Jing, YANG Yingju. Photothermal catalytic CO_2 reduction performance of iron–based perovskite catalysts[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(11):3814–3819.

[11] XU Y K, WANG L, ZHOU Q, et al. Carbon dioxide enabled hydrogen storage by methanol: Highly selective and efficient catalysis with well–defined heterogeneous catalysts[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2024, 508:215775.

[12] ESTEVEZ R, AGUADO–DEBLAS L, BAUTISTA F M, et al. A review on green hydrogen valorization by heterogeneous catalytic hydrogenation of captured CO_2 into value–added products[J]. Catalysts, 2022, 12(12):1555.

[13] 翟云楚,金丽艳,谢佳家,等. 二氧化碳加氢合成甲醇工艺系统分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5):50–56.
ZHAI Yunchu, JIN Liyan, XIE Jiajia, et al. System analysis of methanol synthesis by carbon dioxide hydrogenation[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5):50–56.

[14] ALIZADEH S M, KHALILI Y, AHMADI M. Comprehensive review of carbon capture and storage integration in hydrogen production: Opportunities, challenges, and future perspectives[J]. Energies, 2024, 17(21):5330.

[15] TI W, NG D K S, ANDIAPPAN V. Optimal integration of hydrogen production process with carbon dioxide capture,utilisation and storage [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415: 137697.

[16] 张锦川,杨应举,刘晶,等. Ni/SSZ–13催化剂的CO_2甲烷化反应性能研究[J]. 燃料化学学报,2021, 49(7):960–966.
ZHANG Jinchuan, YANG Yingju, LIU Jing, et al. Catalytic activity of Ni/SSZ–13 catalyst for CO_2 methanation[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2021, 49(7):960–966.

[17] 林海周,罗志斌,裴爱国,等. 二氧化碳与氢合成甲醇技术和产业化进展[J]. 南方能源建设,2020, 7(2):14–19.
LIN Haizhou, LUO Zhibin, PEI Aiguo, et al. Technology and industrialization progress on methanol synthesis from carbon dioxide and hydrogen[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(2):14–19.

[18] DANG S S, YANG H Y, GAO P, et al. A review of research progress on heterogeneous catalysts for methanol synthesis from carbon dioxide hydrogenation[J]. Catalysis Today, 2019, 330:61–75.

[19] 王霖晗,周宇,沈凯,等. $ZnZrO_x$催化二氧化碳加氢制甲醇的工艺性能研究[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(3):405–412.
WANG Muhan, ZHOU Yu, SHEN Kai, et al. Process performance study of $ZnZrO_x$ solid solution catalysts in the hydrogenation of carbon dioxide to methanol[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(3): 405–412.

[20] 肖江,王会民,王为锋,等. 陕煤集团400万t/a CO_2捕集与封存技术研究与探索[J]. 煤炭学报, 2025, 51(2):1703–1711.
XIAO Jiang, WANG Huimin, WANG Wweifeng, et al. Research and Exploration on Shaanxi coal group's 4–million–ton/year

CO_2 capture and storage technology[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 51(2): 1703–1711.

[21] YE J Y, LIU C J, MEI D H, et al. Active oxygen vacancy site for methanol synthesis from CO_2 hydrogenation on In_2O_3(110): A DFT study[J]. ACS Catalysis, 2013, 3(6): 1296–1306.

[22] SHEN C Y, SUN K H, ZHANG Z T, et al. Highly active Ir/In_2O_3 catalysts for selective hydrogenation of CO_2 to methanol: Experimental and theoretical studies[J]. ACS Catalysis, 2021, 11(7):4036–4046.

[23] HU J T, YU L, DENG J, et al. Sulfur vacancy–rich MoS_2 as a catalyst for the hydrogenation of CO_2 to methanol[J]. Nature Catalysis, 2021, 4(3):242–250.

[24] 肖一杨,杨应举,刘晶. CO_2电催化还原的MS2型金属硫化物催化剂理性设计与高通量筛选[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(11):3538–3543.
XIAO Yiyang, YANG Yingju, LIU Jing. Rational design and high–throughput screening of transition–metal dichalcogenides catalysts for CO_2 electroreduction[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(11):3538–3543.

[25] WANG J J, MEEPRASERT J, HAN Z, et al. Highly dispersed Cd cluster supported on TiO_2 as an efficient catalyst for CO_2 hydrogenation to methanol[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2022, 43(3):761–770.

[26] WANG W, WANG S P, MA X B, et al. Recent advances in catalytic hydrogenation of carbon dioxide[J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(7):3703–3727.

[27] AIT EL FAKIR A, DU P F, YANG B, et al. A review on catalytic ethanol synthesis via hydrogenation of carbon dioxide[J]. ChemSusChem, 2025, 18(14):e202500188.

[28] LIU M, YI Y H, WANG L, et al. Hydrogenation of carbon dioxide to value–added chemicals by heterogeneous catalysis and plasma catalysis[J]. Catalysts, 2019, 9(3):275.

[29] LEONZIO G. State of art and perspectives about the production of methanol, dimethyl ether and syngas by carbon dioxide hydrogenation[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2018, 27: 326–354.

[30] BABAPOOR A, SAMIMI F, MIRZAYI B, et al. Alternative strategies for effective utilization of carbon dioxide in dimethyl ether synthesis[J]. Chemical Engineering& Technology, 2023, 46(5):956–968.

[31] ATEKA A, RODRIGUEZ–VEGA P, ERENA J, et al. A review on the valorization of CO_2. Focusing on the thermodynamics and catalyst design studies of the direct synthesis of dimethyl ether[J]. Fuel Processing Technology, 2022, 233:107310.

[32] LI X P, KE J C, LI R, et al. Research progress of hydrogenation of carbon dioxide to ethanol[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 282:119226.

[33] ERDHELYI A. Hydrogenation of carbon dioxide on supported Rh catalysts[J]. Catalysts, 2020, 10(2):155.

[34] CAPARROS F J, SOLER L, ROSSELL M D, et al. Remarkable carbon dioxide hydrogenation to ethanol on a palladium/iron oxide single–atom catalyst[J]. ChemCatChem, 2018, 10(11): 2365–2369.

[35] WANG L X, HE S X, WANG L, et al. Cobalt– nickel catalysts for selective hydrogenation of carbon dioxide into ethanol[J]. ACS Catalysis, 2019, 9(12):11335–11340.

[36] 王清华,肖一杨,杨应举,等. 二氧化碳电催化剂理论设计方法研究进展[J]. 新能源进展,2023, 11(6):524–533.
WANG Qinghua, XIAO Yiyang, YANG Yingju, et al. Recent progress of theoretical design methods for CO_2 electrocatalytic reduction catalysts[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(6):524–533.

[37] YOO J S, CHRISTENSEN R, VEGGE T, et al. Theoretical insight into the trends that guide the electrochemical reduction of carbon dioxide to formic acid[J]. ChemSusChem, 2016, 9(4):358–363.

[38] BAHUGUNA A, SASSON Y. Formate–bicarbonate cycle as a vehicle for hydrogen and energy storage[J]. ChemSusChem, 2021, 14(5):1258–1283.

[39] NANKYA R, ELGAZZAR A, ZHU P, et al. Catalyst design and reactor engineering for electrochemical CO_2 reduction to formate and formic acid[J]. Materials Today, 2024, 76:94–109.

[40] JIN S, HAO Z M, ZHANG K, et al. Advances and challenges for the electrochemical reduction of CO_2 to CO: From fundamentals to industrialization[J]. Angewandte Chemie, 2021, 133(38):20795–20816.

[41] LI L, OZDEN A, GUO S Y, et al. Stable, active CO_2 reduction to formate via redox–modulated stabilization of active sites[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 5223.

[42] ROSS M B, DE LUNA P, LI Y F, et al. Designing materials for electrochemical carbon dioxide recycling[J]. Nature Catalysis, 2019, 2(8):648–658.

[43] EWIS D, ARSALAN M, KHALED M, et al. Electrochemical reduction of CO_2 into formate/formic acid: A review of cell design and operation[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 316:123811.

[44] ZHAO B T, SU Y X. Macro assessment of microalgae–based CO_2 sequestration: Environmental and energy effects[J]. Algal Research, 2020, 51: 102066.

[45] UDAYAN A, PANDEY A K, SIROHI R, et al. Production of microalgae with high lipid content and their potential as sources of nutraceuticals[J]. Phytochemistry Reviews, 2023, 22(4): 833–860.

[46] 杨桂娟,栾忠奇,周笑辉. 温度对小球藻生长量和溶氧量影响研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(9):157–158,161.
YANG Gguijuan, LUAN Zhongqi, ZHOU Xiaohui. Researching on the effect of temperature on chlorella growth and dissolved oxygen content[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(9):157–158, 161.

[47] 张娟梅,江贤章,黄建忠. 裂殖壶菌Schizochytrium sp.FJU–512细胞油脂的研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2007, 23(2):75–80.
ZHANG Juanmei, JIANG Xianzhang, HUANG Jianzhong. Studies on cell oil produced by schizochytrium sp. FJU–512[J]. Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition), 2007, 23(2): 75–80.

[48] 高静思,朱佳,董文艺. 光照对我国常见藻类的影响机制及其

应用[J]. 环境工程, 2019, 37(5):111–116.
GAO Jingsi, ZHU Jia, DONG Wenyi. Influence mechanism of light on common algae and its application[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5):111–116.

[49] 马雪彬,李赟,朱葆华,等. CO_2对小球藻固碳速率及物质合成的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(S2):29–36.
MA Xuebin, LI Yun, ZHU Baohua, et al. Effect of CO_2 on carbon sequestration rate and material synthesis of chlorella sp[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(S2): 29–36.

[50] NARALA R R, GARG S, SHARMA K K, et al. Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two–stage hybrid system[J]. Frontiers in Energy Research, 2016, 4: 29.

[51] TRIPATHI S, CHOUDHARY S, MEENA A, et al. Carbon capture, storage, and usage with microalgae: A review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21(4):2085–2128.

[52] 王香增,杨红,刘芳娜,等. 延长石油CO2捕集与封存技术及实践[J]. 煤炭科学技术,2024, 52(9):248–262.
WANG Xiangzeng, YANG Hong, LIU Fangna, et al. Technology and practice of CO2 capture and storage from Yanchang Petroleum[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 248–262.

[53] 黄海泉,黄晓巍,姜望,等. 新型配电网分布式储能系统方案及配置研究综述[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4):42–53.
HUANG Haiquan, HUANG Xxiaowei, JIANG Wang, et al. A review of distributed energy storage system solutions and configurations for new distribution grids[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(4):42–53.

[54] 赵威翰,徐进,田新,等. 考虑价格型需求响应的风–光–储综合能源系统日前优化调度研究[J]. 电力科技与环保, 2025, 41(6):878–887.
ZHAO Weihan, XU Jin, TIAN Xin, et al. Research on day–ahead optimization scheduling of integrated wind–power–storage energy systems considering price–based demand response[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2025, 41(6): 878–887.

[55] WANG C Y, LAI H, WARKENTIN H, et al. Catalysts for electrochemical CO_2 conversion: Material sustainability perspective[J]. npj Materials Sustainability, 2025, 3(1):22.

第一作者简介:曹新悦(2004—),女,本科生,主要从事二氧化碳高值化利用的储能技术等方面的研究,2717076019@qq.com;

共同第一作者简介:高展颜(2006—),女,本科生,主要从事二氧化碳高值化利用技术等方面的研究,3088923293@qq.com;

通信作者简介:杨应举(1990—),男,副教授,主要从事CO_2高值化利用、氢能、催化燃烧、燃烧污染物控制等方面的研究,yangyingju@hust.edu.cn;

通信作者简介:苏　毅(1990—),男,博士研究生,主要从事碳捕集与利用等方面的研究,suyi@smderi.com.cn;

黄　俊(2001—),男,硕士研究生,主要从事二氧化碳催化加氢合成高附加值燃料等方面的研究,m202371242@hust.edu.cn;

通信作者简介:吴大卫(1992—),男,博士研究生,主要从事碳捕集与利用等方面的研究,wudawei@gedi.com.cn;

沈　腾(1990—),男,硕士研究生,主要从事碳捕集与利用等方面的研究,dxrsklcc@163.com;

陈　苗(1983—),女,硕士研究生,主要从事二氧化碳催化加氢等方面的研究,miaochen1001@163.com;

刘　晶(1974—),女,博士研究生,主要从事碳捕集与利用、化学链燃烧、燃烧污染物控制等方面的研究,liujing27@mail.hust.edu.cn。

(**编辑**　刘　灿)