

特约评述

DOI: 10.12211/2096-8280.2026-036

纳米材料-微生物杂合体在环境领域的原理及应用

刘宇晖, 周思志, 陈曼, 周顺桂

(福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘要: 集成纳米材料优异的光电性能与活体细胞高效的生物转化能力, 纳米材料-微生物杂合体在环境修复与资源化利用领域展现出巨大潜力。近年来, 材料工程和微生物工程的发展, 极大地拓展了纳米材料-微生物杂合体在复杂环境场景中的应用。本文以光生电子的生成、界面电子转移及胞内电子利用为主线, 系统阐明了杂合体在环境修复领域的应用原理; 梳理了纳米材料-微生物杂合体在无机污染治理、难降解有机物降解及二氧化碳(CO₂)高值化转化中的应用现状; 并探讨了环境相容性纳米光敏材料的优化、环境微生物底盘的改造、多物理场耦合等优化策略。此外, 本文针对当前纳米材料-微生物杂合体在环境领域应用的局限性进行了批判性评述, 并提出了前瞻性的研究方向。

关键词: 纳米材料-微生物杂合体; 界面电子传递; 污染物降解; CO₂高值化转化

中图分类号: Q815 **文献标志码:** A

Principles and applications of nanomaterial-microorganism hybrids in the environmental field

LIU Yuhui, ZHOU Sizhi, CHEN Man, ZHOU Shungui

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: By integrating the superior photoelectric properties of nanomaterials with the efficient biotransformation capabilities of microorganisms, nanomaterial-microorganism hybrids exhibit tremendous potential in environmental remediation and resource recovery. Recent advancements in materials and microbial engineering have significantly expanded the applications of these biohybrids in complex, highly dynamic environmental scenarios. Focusing on photoelectron generation, interfacial electron transfer, and intracellular electron utilization, this review systematically elucidates the mechanistic principles underlying these hybrids in environmental fields. Specifically, we detail how photogenerated electrons are harvested, transferred across the nano - bio interface, and ultimately incorporated into cellular metabolic networks to drive targeted redox reactions and resource conversion processes. Furthermore, we summarize their current applications across various environmental domains and categorize recent breakthroughs by target pollutant types and resource recovery outputs. For inorganic pollutants, biohybrids enable sustainable nitrate

收稿日期: 2026-04-30 修回日期: 2026-07-01

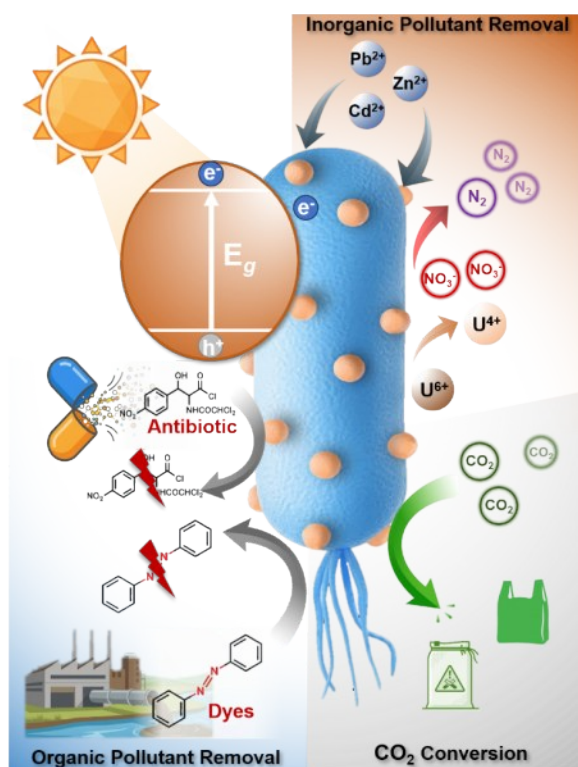
基金项目: 国家自然科学基金 (42525702)

引用本文: 刘宇晖, 周思志, 陈曼, 周顺桂. 纳米材料-微生物杂合体在环境领域的原理及应用[J]. 合成生物学, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-036

Citation: LIU Yuhui, ZHOU Sizhi, CHEN Man, ZHOU Shungui. Principles and applications of nanomaterial-microorganism hybrids in the environmental field[J].

Synthetic Biology Journal, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-036

reduction and heavy metal detoxification via biomineralization or valence state transformation, effectively immobilizing hazardous contaminants such as hexavalent chromium and lead. For organic pollutants, they facilitate the degradation of recalcitrant compounds, such as azo dyes and emerging pharmaceutical antibiotics, often utilizing advanced heterojunction designs to enhance charge separation and minimize energy recombination losses. The review also highlights their crucial role in the high-value conversion of carbon dioxide (CO_2) into fuels and biochemicals, including methane, acetate, and bioplastics. To overcome existing performance bottlenecks in real-world environments, we explore advanced optimization strategies, such as the enhancement of energy input through multi-physical field coupling, the development of environmentally compatible nano-photosensitive materials and the engineering of environmental microbial chassis. Additionally, a critical assessment is provided regarding current limitations, particularly techno-economic barriers that hinder large-scale deployment, reactive oxygen species (ROS) toxicity, and ecological safety concerns about genetic escape in open ecosystems. Finally, this review proposes forward-looking research directions. We emphasize integrating artificial intelligence, machine learning, and digital twin technologies to map, model, and intelligently optimize these complex biohybrid systems for practical applications.



Keywords: Nanomaterial-Microorganism Biohybrids; Interfacial Electron Transfer; Pollutant Degradation; CO_2 valorization

1 引言

面对严峻的能源与环境危机，寻求绿色、可持续的环境治理与资源循环手段迫在眉睫^[1, 2]。太阳能作为地球上最丰富、最易获取的可再生能源，

为驱动环境污染物的降解和资源的绿色转化提供了理想的能量来源^[3, 4]。自然界中的天然光合生物（如植物、藻类和部分光合微生物）能够精妙地将太阳能转化为化学能，但其光能转换效率极低（多数作物的转换效率仅为0.2%至1%）^[5-8]。为突

破这一自然瓶颈,利用光催化剂或半导体材料来模拟和强化光化学反应的纯人工光合作用系统应运而生^[9-11]。然而,纯人工体系在应对复杂环境下的水土污染时,往往面临催化选择性差、长期运行稳定性不足,以及难以复制生物体高度集成的多步生化代谢路径等重大挑战^[10, 12]。

面对上述挑战,纳米材料-微生物杂合体(Nanomaterial-Microorganism Biohybrids)作为一种新兴的多学科交叉技术,凭借其独特的协同优势,为解决复杂环境问题带来了全新的思路。该技术通常将纳米合成材料(如半导体纳米颗粒、量子点等)与活体微生物(细菌、古菌、真核微生物)进行功能集成^[13-15]。其核心机制在于:纳米材料作为光敏剂高效捕获太阳能并生成光生电子,随后通过界面电子转移机制传递给微生物,进而驱动其特定代谢途径,实现污染物脱毒、降解或二氧化碳(CO₂)高值转化。这类杂合体巧妙结合了纳米材料卓越的光电、催化性能与微生物高效的生物催化、自我修复及代谢多样性,在环境领域展现出超越单一生物或人工体系的巨大潜力^[16-18]。

从发展历程来看,纳米材料-微生物杂合体研究经历了长期的演进,其雏形最早可追溯至1987年。Krasnovsky等人首次将TiO₂等无机半导体与丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)相耦合,利用光照下产生的光生电子驱动细菌氢化酶催化产氢,开创了半导体-微生物杂合体系的先例^[19]。此后,该领域经历了较长时间的探索与积累。2012年,Lu等人发现自然环境中广泛存在的半导体矿物能够通过光生电子促进非光合微生物生长,揭示了自然界中潜在的“矿物-微生物光能利用机制”^[20]。随后,Sakimoto等人于2016年报道了热乙酸穆尔氏菌(*Moorella thermoacetica*)可通过生物矿化在细胞表面原位生成CdS纳米颗粒,实现光驱动二氧化碳(CO₂)还原制乙酸,为现代纳米材料-微生物杂合体的构建奠定了重要基础^[21]。进一步地,Guo等人于2018年将纳米光敏材料与工程化酿酒酵母(*S. cerevisiae*)相结合,实现了莽草酸的高效光驱合成,标志着该技术从原核微生物向真核微生物体系的拓展^[22]。上述关键突破推动了纳米材料-微生物杂合体逐步从概念验证阶段发展成为

融合材料科学、微生物学与环境工程的前沿研究方向。

近十年来,随着材料科学和微生物技术的持续发展与交叉融合,纳米材料-微生物杂合体系在多元复杂环境场景中的应用边界得到了极大拓展^[23]。本文以光生电子的生成、界面电子转移及胞内电子利用为主线,系统阐明杂合体在环境领域的应用原理;梳理纳米材料-微生物杂合体在无机污染治理、有机物降解及CO₂高值化转化中的应用现状;并探讨了环境相容性纳米光敏材料的优化、环境微生物底盘的改造、多物理场耦合等优化策略。此外,本文针对当前纳米材料-微生物杂合体在环境领域应用的局限性进行了批判性评述,并提出了前瞻性的研究方向。

2 纳米材料-微生物杂合体中光生电子的生成

2.1 光生电子生成

太阳能作为地球生命的核心能源,兼具无限可再生性与清洁性,其辐射光谱近似于5900K黑体。尽管穿过大气层时因臭氧、水蒸气等气体的选择性吸收,太阳辐射的光谱分布会发生显著改变,但到达地表的辐射仍覆盖紫外、可见及红外波段^[24](图1a)。太阳能的高效捕获与转化是驱动纳米材料-微生物杂合体运行的核心基础也是杂合体运转的第一步(图1b)。在光照条件下,当入射光子能量大于或等于半导体纳米材料的带隙(E_g)时,价带(Valence Band, VB)中的电子受激发跃迁至导带(Conduction Band, CB),并在价带留下带正电的空穴,形成光生电子-空穴对,从而实现光激发的电荷分离^[25, 26]。具体而言,根据波长(λ)和光子能量(E)的关系:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

其中, h 为普朗克常数($6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), c 为光速($3.00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),通过带入常数并转换单位后,可得最大入射光波长 λ_{max} (nm)和带隙能 E_g (eV)的关系为:

$$\lambda_{\max} = \frac{1240}{E_g}$$

由此可见，光活性物质的 E_g 越小， $\lambda_{\max}$ 越大，则太阳光谱吸收范围越大；反之， E_g 越大， $\lambda_{\max}$ 越小，则太阳光谱吸收范围越小。

在电荷分离后，CB上的光生电子充当了“胞外电子储库”，可通过特定的胞外电子传递（Extracellular Electron Transfer, EET）途径进入微

生物的电子传递链中；而VB上留下的强氧化性空穴则通常需要借助牺牲电子供体（SED）来淬灭。这一机制有效抑制了电荷复合，维持了连续的跨界电子流，为下游生化反应提供了持续的驱动力。

2.2 纳米光敏材料的分类与特点

作为杂合体的核心捕光单元，纳米光敏材料

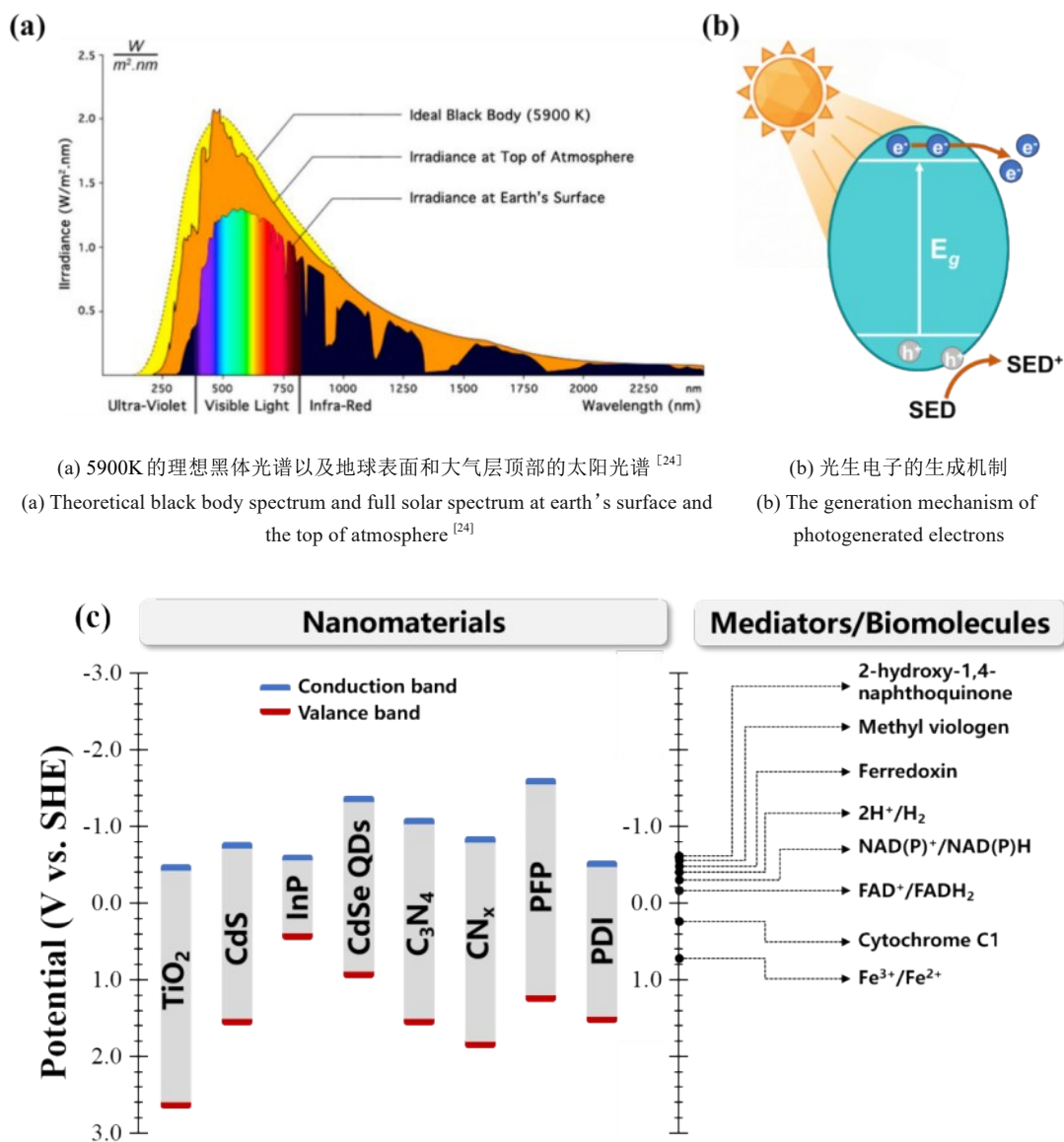


图1 纳米材料-微生物杂合体中光生电子的生成

Fig. 1 The generation of photogenerated electrons in biohybrid systems

负责捕获光子、产生载流子^[13, 27, 28], 并驱动跨越非生物-生物界面的电子转移, 从而激活微生物的特定生化转化路径(图1c)^[29]。因此, 纳米材料的合理选择直接决定了杂合体的光能转化效率与整体催化性能。目前, 纳米光敏材料主要分为无机与有机两大类。

无机纳米材料因其易于规模化生产、高结晶度以及光电性能可调等优势而备受青睐^[30, 31]。特别是II-VI族元素组成的金属基纳米材料, 凭借其在化学组分、晶体结构、表观形貌及表面化学特性上的精准可控性, 已成为极具潜力的候选材料^[32]。例如, 化学合成的金属基纳米材料(如CdS^[33-35]、ZnS^[36-38]、MoS₂^[39]、TiO₂^[40-42]等)已被广泛应用于纳米材料-微生物杂合体中。除化学合成路径外, 近年来, 生物合成的金属硫化物纳米材料因其绿色环保的合成路线及卓越的生物相容性而引起广泛关注^[43]。例如, 以半胱氨酸为硫源并引入Cd²⁺或In³⁺, 可诱导CdS或In₂S₃纳米颗粒在微生物细胞表面发生原位矿化^[21, 44]。这一过程不仅促进了无机材料与细胞的紧密结合, 还成功构筑了非生物-生物电子传递界面。作为金属体系的重要补充, 非金属基纳米材料同样展现出低细胞毒性、高环境相容性以及优异的光电可调性等显著优势^[45-47]。其本征的结构稳定性和表面反应活性, 能够有效促进材料与微生物细胞间的强相互作用及高效的电子转移。其中, 最具代表性的非金属材料为石墨相氮化碳(g-C₃N₄)或聚合氮化碳(CN_x)^[46, 48-50]。这类富氮聚合物在构建致密的纳米材料-生物界面潜力巨大: 其层状结构和适宜的带隙不仅能高效利用可见光, 更重要的是, 其卓越的生物相容性能不干扰微生物内源代谢的前提下, 实现与生物体系的长期稳定共存^[51]。

尽管部分无机纳米材料(如CdS)具有优异的捕光性, 但其往往面临较高的细胞毒性风险^[15, 52]。这种毒性主要源自游离重金属离子(如Cd²⁺)释放引起的酶失活^[14], 以及无机纳米晶体通过强烈的紫外吸收引发的氧化应激(即“光毒性”), 进而对细胞膜、核酸及真核微生物的线粒体造成不可逆损伤^[53]。在这一背景下, 有机纳米材料凭借其结构多功能性与优异的生物相容性, 在构建纳米材料-微生物杂合体中备受瞩目^[54]。有机纳米材料

不仅排除了重金属泄漏的风险, 且其相对缓和的载流子迁移率有助于延长电荷寿命, 有效抑制由强氧化性空穴介导的有害副反应, 从而大幅削弱光毒性^[55]。此外, 有机纳米材料还能在微生物外围自组装形成一层“物理铠甲”, 为细胞抵御外部环境胁迫提供坚实的保护^[17, 56, 57]。更重要的是, 有机纳米材料的 π 共轭分子骨架赋予材料高摩尔吸光系数、宽光谱响应范围以及可调控的能级结构。因此, 通过合理的分子设计(如供体-受体设计), 有机纳米材料能精准匹配微生物的跨膜氧化还原电势^[29, 58, 59]。此外, 有机纳米材料还能充当“光子转换层”, 将非靶向入射光转换为更契合目标微生物吸收光谱的波长并发射出来。例如, 聚(苐-共-亚苯基)(PFP)能将紫外光转化为可见光发射(400-500 nm), 与聚球藻(*Synechococcus* sp.)的吸收光谱高度重合^[60]。这种光转换特性为拓宽可用的太阳光谱带及优化微生物光响应提供了极具前景的策略。

3 纳米材料-微生物杂合体中光生电子的转移

3.1 非生物-生物界面电子转移的路径

光激发后, 胞外生成的电子需要跨越非生物-生物界面转移至微生物底盘, 其路径主要包括直接电子转移(DET)、介体电子转移(MET)以及利用无机能量载体(如H₂)和有机小分子等(图2)^[29, 61]。在DET系统中, 微生物细胞与纳米颗粒表面之间的紧密物理接触, 有效缩短了电子向膜结合受体(如细胞色素和氢化酶)传递的隧穿距离^[13]。MET则依赖于可溶性氧化还原介体(如黄素、醌类或合成小分子)在纳米材料与微生物之间穿梭传递电子。除上述两种标准途径外, 无机或有机电子载体也发挥着关键的跨界桥梁作用。一方面, 纳米材料表面光化学反应生成的H₂可作为自由扩散的电子载体, 进入胞内后被氢化酶氧化, 从而驱动ATP和还原当量的生成^[29]。另一方面, 纳米光敏材料可通过多电子转移或空穴氧化还原反应, 驱动CO₂还原为乙酸、甲酸和乳酸等有机小分子^[62, 63]。这些化合物作为“代谢货币”被微生物

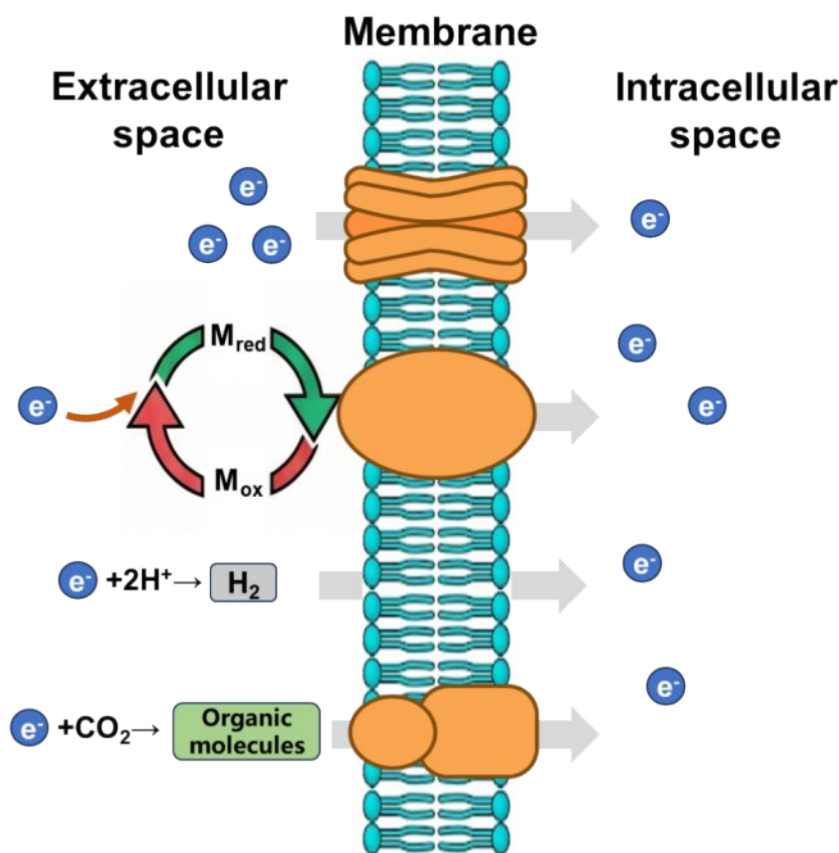


图2 纳米材料-微生物杂合体中的界面电子转移机制
(M—介体)

Fig. 2 Process of electron transfer in the biohybrid system
(M—mediator)

摄取，不仅实现了电子的递送，还同步提供了碳源，从而为高附加值化学品的靶向生物合成铺平了道路^[64]。

3.2 微生物底盘的类型与电子接收机制

合理设计纳米材料-微生物杂合体的前提，是对底盘细胞如何“捕获、转运并利用”外源电子的深刻认知。以微生物与纳米材料界面的电子传递途径为核心标准，可将杂合体的微生物底盘划分为三大类：具有直接胞外电子传递能力的微生物、不具有直接胞外电子传递能力但可实现替代性电子摄取的微生物，以及具备天然光合作用体系的光合微生物。

具有胞外电子传递能力的微生物底盘。经典的电话性细菌（如希瓦氏菌 *S. oneidensis* 及地杆菌属）是杂合平台中最受关注的底盘^[65]。它们依赖

结构清晰的外膜/周质细胞色素网络或导电附属物（如菌毛或纳米线）以及可溶性氧化还原介体（如黄素），将电子逆向注入呼吸链，实现高效的电学偶联^[66]。这些电子传递通路不仅能高效驱动光催化的氧化还原转化，还为生物杂合平台中引入合成生物学与代谢工程改造提供了易于操作的基因靶点。作为一种硫氧化自养菌，脱氮硫杆菌（*T. denitrificans*）能够同化来自电极或光激发纳米颗粒的电子以驱动 NO_3^- 的还原，从而在光养条件下维持其自养生长^[67, 68]。此外，产甲烷古菌巴氏甲烷八叠球菌 *M. barkeri* 同样具备明确的EET能力，它能够通过分子氢或直接EET机制从非生物界面捕获电子，并将之引入胞内多条产甲烷途径，在纳米材料-微生物杂合体中实现太阳能驱动的高效固碳产甲烷^[69-71]。在真核生物中，最新证据表明酿酒酵母（*S. cerevisiae*）等真菌亦能通过膜相关的特定氧化还原蛋白网络，实现非介体依赖型的直

接电子摄取^[72]。

不具有典型胞外电子传递能力的微生物底盘。许多微生物缺乏经典的外膜细胞色素或导电菌毛等EET组件，但可通过替代性电子摄取途径，将纳米材料产生的光生电子条件性地引入胞内，展现出灵活的胞内电子利用潜能。例如，模式氢氧化细菌 *C. necator* 虽无直接EET能力，但可通过可溶性氧化还原穿梭体和内源性 [NiFe]-氢化酶高效获取电子，并将其导入呼吸链，最终通过卡尔文-本森-巴沙姆 (CBB) 循环实现 CO₂ 的固定^[73]。热乙酸穆尔氏菌 (*M. thermoacetica*) 则能利用通过膜结合氢化酶摄取 H₂ 及其他电子供体，驱动 Wood-Ljungdahl 途径 (WLP) 合成乙酸，并在电子输入源上展现出比专性氢营养菌更大的灵活性^[74]。这类不依赖经典EET硬件、却依然能实现胞外电子内向传递的机制，显著扩展了可用于胞内电子利用的底盘边界。

具天然光合作用的微生物底盘。对于天然光合微生物而言，其自身高度保守的光系统支撑着产氧光合作用与 CO₂ 的固定。这类底盘是构建“双重光激发系统”的绝佳选择。该类底盘涵盖了原核的蓝细菌门（如聚球藻属 *Synechococcus* spp.^[75]、集胞藻属 *Synechocystis* spp.^[75]、念珠藻属 *Nostoc* spp.^[39, 41] 等）以及真核微藻（如蛋白核小球藻 *C. pyrenoidosa*^[76]）。当与纳米材料整合后，外源的纳米光敏材料充当了“人工捕光天线”，将产生的光生电子注入微生物天然电子传递通路。这种“内源光合+外源注入”的协同激发策略，不仅突破了天然色素对太阳光谱吸收的理论极限，更显著强化NADPH的再生^[77, 78]。高浓度的NADPH随后加速了下游卡尔文循环的碳同化速率，使得此类杂合体在产氧与固碳效率上展现出远超野生型菌株的量子产率^[75, 79]。

3.3 胞内电子转移

完成跨膜运输后，光生电子主要用于驱动生物代谢必需的还原当量（如NADH和NADPH）以及ATP的合成^[15]。这些化合物构成了微生物底盘最核心的“能量货币池”，支撑着下游复杂的CO₂固定及生物转化。然而，在天然电子代谢网络

中，外源电子的流向并非完全定向，而是面临着多重内源电子受体与目标产物合成途径之间的激烈竞争。例如，在酿酒酵母利用NADPH合成目标产物莽草酸的过程中，其内源的脂肪酸合成途径也会竞争性地消耗NADPH。这种争夺会导致显著的能量耗散，构成了竞争性副反应，极大限制了目标化合物合成通路的能量利用效率。

针对复杂的电子竞争关系，可通过合成生物学与系统性优化策略实现电子代谢的重塑与工程化分流。一方面，可以通过基因工程削弱竞争支路，例如，在表面结合 InP 纳米材料的酿酒酵母中，敲除其自身NADPH再生关键基因 *ZWF1*，迫使细胞高度依赖纳米材料光驱再生的NADPH，从而将电子流定向引流至莽草酸合成中。或通过定向进化和代谢工程重新布线代谢网络，将过剩的能量形式特异性地重定向至产物合成中。除此之外，研究者还开发了“能量池旁路”策略，利用锚定于胞内的纳米材料直接将光生电子传递给特定的靶标酶分子（如氢化酶^[80]或MoFe固氮酶^[81]），绕过繁琐的胞内能量池循环。这种策略巧妙规避了多步生化反应中常见的能量损耗，实现了极高的电子利用特异性，将能量损耗降至最低，为高效太阳能-化学能转化奠定了物理基础。

4 纳米材料-微生物杂合体在环境领域的应用

4.1 无机污染物的脱毒

在各种无机污染物中，含氮化合物（尤其是硝酸根离子，NO₃⁻）因其高溶解性、环境持久性和生物毒性，成为水生系统中的一类主要污染物^[82, 83]。传统处理方法主要为非生物法和生物反硝化法。非生物法主要包括化学还原法、离子交换法、反渗透膜法、电渗析膜法等。然而，非生物法普遍存在能耗偏高、运行成本大等问题，生物反硝化法则高度依赖外源有机碳源，易受水质波动影响^[84, 85]。为应对这些挑战，纳米材料-微生物杂合体已成为一种极具前景的方案^[86, 87]。例如，脱氮硫杆菌 *T. denitrificans* 与CdS构建的杂合体能够在无含硫电子供体的情况下，通过光照高效还

原硝酸盐^[88]。在纳米材料-微生物杂合体中,微生物分泌的胞外聚合物(EPS)甚至自然界水/土界面的有机质,都能作为牺牲试剂或辅助电子源促进载流子分离与转移。这种低能耗的光电赋能脱氮新思路,展现出了卓越的脱氮潜力。

然而,与传统微生物反硝化过程不同,基于纳米材料-微生物杂合体的硝酸盐还原主要气体产物为强效温室气体氧化亚氮(N_2O),这削弱了该技术的环境效益与处理效率^[89]。研究表明, N_2O 的释放主要是由于体系中活性氧物种(Reactive Oxygen Species, ROS)的大量积累^[87]。为此,研究人员已开发出多种界面工程来调控ROS水平,以提升系统稳定性与反硝化性能^[90, 91]。例如,Chen等人开发了一种*T. denitrificans*-CdS@ Mn_3O_4 杂合体,其表面的 Mn_3O_4 纳米酶涂层促进了ROS的瞬时分解并实现了物理隔离,使羟基自由基($\cdot OH$)、超氧自由基($O_2^{\cdot -}$)和过氧化氢(H_2O_2)的浓度分别降低了90%、77.6%和26%,显著提高 NO_3^- 的还原率并抑制 N_2O 排放^[87]。更进一步,还可通过反应器设计(例如光伏型光电自养反硝化反应器),将ROS与反硝化菌*T. denitrificans*完全隔离,使得硝酸盐能够被选择性地(100%)还原为氮气,实现可持续的硝酸盐去除(图3a)^[92]。此外,纳米材料-微生物杂合体还面临着光生电子速率与微生物利用电子速率不匹配的问题。为此,研究人员引入具有储能特性的材料(如蒽醌或特殊结构的氮化碳)实现电子的“光照储存、暗处缓释”。例如,Chen等人以具有储存电子能力的蒽醌为光敏剂构建了微生物光电反硝化体系,将光照后未被微生物及时利用的光电子能够以氢醌形式储存,随后逐渐释放至微生物,使得该体系光量子效率高达96.2%^[93]。

重金属污染因其高毒性和生物累积性严重威胁生态安全。相较于传统的物理化学去除手段,纳米材料-微生物杂合体凭借其低成本、低碳排放和环境友好的优势,为重金属修复提供了创新方案(表1)。该体系的核心在于通过微生物矿化作用将废水中的重金属离子转化为功能性光催化剂^[103]。一个典型的案例是微生物主导的CdS纳米颗粒合成过程,该过程在有效降低环境中 Cd^{2+} 浓度的同时,成功构建了功能性的生物杂合体

(图3b)^[104, 105]。这些生成的纳米材料会作为“光捕获天线”,在光照下产生光生电子并直接转移至细胞内。例如,在脱硫弧菌(*D. desulfuricans* G20)与生物源ZnS(Bio-ZnS)构建的体系中,ZnS产生的光生电子能加速胞内异化硫酸盐还原路径的代谢。该路径释放的 H_2S 随后充当“化学沉淀剂”,将水体中重金属 Pb^{2+} 锚定为不溶性的PbS纳米颗粒^[95]。这一过程不仅实现了重金属的协同去除,还能与高附加值化学品(如2,3-丁二醇)的生产相整合,拓宽了环境修复的经济价值^[106]。

除了矿化沉淀,纳米材料-微生物杂合体还具备氧化还原脱毒能力。通过分离光生电子与空穴,体系能改变重金属离子的价态,将剧毒形态转化为低毒或无毒状态^[107]。例如,Chen等人构建了一种光敏型腐败希瓦氏菌生物杂合体(*S. putrefaciens*-CdS),能够从铀矿废水中去除90%以上的U(VI)(图3c)^[96]。另一方面,某些在低价态表现出高毒性的重金属离子也可在生物杂合体中充当牺牲试剂。例如,Zuo等人选择从辐射和重金属污染的土壤中分离出来的苏云金芽孢杆菌(*B. thuringiensis*)建立光电微生物体用于重金属脱毒研究。在半胱氨酸存在的情况下,*B. thuringiensis*将 Cd^{2+} 矿化成CdS构成*B. thuringiensis*-CdS杂合体,并通过半胱氨酸脱硫酶和偶氮还原酶将Cr(VI)还原成Cr(III),同时还As(III)氧化为毒性较低的As(V)^[97]。总体而言,这种以太阳能为驱动力、显著降低有机碳依赖的光电生物修复策略,为解决复杂重金属污染提供了一种高效、可持续的绿色解法。

4.2 有机污染物的降解与去除

难降解有机污染物(如各类偶氮染料、三苯甲烷染料、抗生素和硝基苯等)因其极高的结构稳定性和抗生物降解性,对传统水处理技术构成了严峻挑战^[108, 109]。此外,传统的生物修复策略又高度依赖外加有机电子供体,不仅增加了运行成本,还带来了二次污染风险^[110]。为应对不同类型的有机污染物,研究人员开发出多种纳米材料-微生物杂合体系,例如用于处理甲基橙的*G. sulfurreducens*-CdS^[100]、处理亚甲基蓝的*E. coli*-

表1 纳米材料-微生物杂合体在无机污染物脱毒和有机污染物降解中的典型应用及性能对比
Table 1 The application and performance comparison of nanomaterial-microorganism biohybrids in the detoxification of inorganic pollutants and the degradation of organic pollutants

纳米材料 类型 Nanomaterial	微生物底盘 Microbes	目标污染物 Pollutant	电子传递 路径 Electron transfer	表观量子 效率 AQY	电子转移速 率常数 Electron transfer rate constant	牺牲 试剂 SED	真实污水/ 土壤验证情况 Validation in real waste water /soil	主要局限 Limitation	参考 文献 Ref.
CdSe _x S _{1-x}	<i>P. aeruginosa</i>	NO ₃ ⁻	直接电子 转移			否	城市生活污水、水产养殖废水、电镀工业废水	长期运行稳定性不足,实际复杂废水的效率受限	[94]
蒽醌-2- 磺酸钠	<i>T. denitrificans</i>	NO ₃ ⁻	介体电子 转移	96.20%		乳酸	无	处理后的废水可能受到蒽醌-2-磺酸钠的二次污染	[93]
CdS	<i>T. denitrificans</i>	NO ₃ ⁻	直接电子 转移	2.00%		乳酸	无	细胞的光损伤以及氢气生成引起的能量损失	[67]
ZnS	<i>D. desulfuricans</i>	Pb(II), PbS	介体电子 转移+直接 电子转移			抗坏血酸	无	光生空穴同样可能会氧化各种低价态离子或有机污染物	[95]
CdS	<i>S. putrefaciens</i>	U(VI)	直接电子 转移		0.058 min ⁻¹	否	真实铀矿废水	六价铀的毒性累积会造成细菌一定程度的损伤	[96]
CdS	<i>B. thuringiensis</i>	Cd(II)、 Cr(VI)、As(III)	直接电子 转移			否	无	酸性条件下,Cr无法完全脱毒	[97]
CdS	<i>S. oneidensis</i> MR-1	直接蓝 71	直接电子 转移			乳酸	无	黑暗条件下,脱色作用受到抑制	[98]
CdS/g- C ₃ N ₄	<i>S. oneidensis</i> MR-1	酸性橙 7	介体电子 转移+直接 电子转移			乳酸	无		[99]
CdS	<i>G. sulfurreducens</i>	甲基橙	直接电子 转移		1.44 ± 0.18 h ⁻¹	否	无	依赖于 CdS 的光稳定性	[100]
CdS	<i>S. decolorationis</i>	苋菜红	直接电子 转移		0.20978 h ⁻¹	抗坏血酸	无		[101]
CdS	<i>C. thermocellum</i>	三苯甲烷染料	直接电子 转移		0.206 min ⁻¹	否	无		[102]

Ag₂S^[111]、处理苋菜红的*S. decolorationis*-CdS^[101]、处理三苯甲烷染料的*C. thermocellum*-CdS^[102]，以及处理直接蓝 71 和硝基苯的*S. oneidensis*-CdS^[98, 112]（表 1）。在此基础上，通过将 Z 型与 II 型异质结与*S. oneidensis* MR-1 相耦合，能够进一步增强电荷分离效率，以高效降解酸性橙 7。其中，Z 型异质结结构显著增强了电荷分离能力，实现了电子在“非生物-生物”界面的快速转移（图 3d）^[99]。

值得注意的是，并非所有杂合体的电子流向都遵循“从纳米光敏材料到微生物”的经典路径，

还存在着“反向电子转移”机制。例如，在*S. oneidensis*-CdS 系统中，光诱导微生物代谢有机物，并通过氧化还原蛋白和细胞色素将释放的电子转移至 CdS 的 VB 空穴中。具体而言，细胞通过底物代谢持续产生还原当量 NADH，电子随后流经 NADH 脱氢酶、甲基萘醌、细胞色素 b561，最终经由外膜细胞色素*c* 复合物直接跨膜注入 CdS 空穴。从能量损益来看，向无机材料的持续电子输出并未导致细胞能量耗竭；相反，杂合体维持了稳定甚至更高的 NADH/NAD⁺ 比率及 ATP 水平，实现了能量代谢的自我调节，使微生物电子传递系

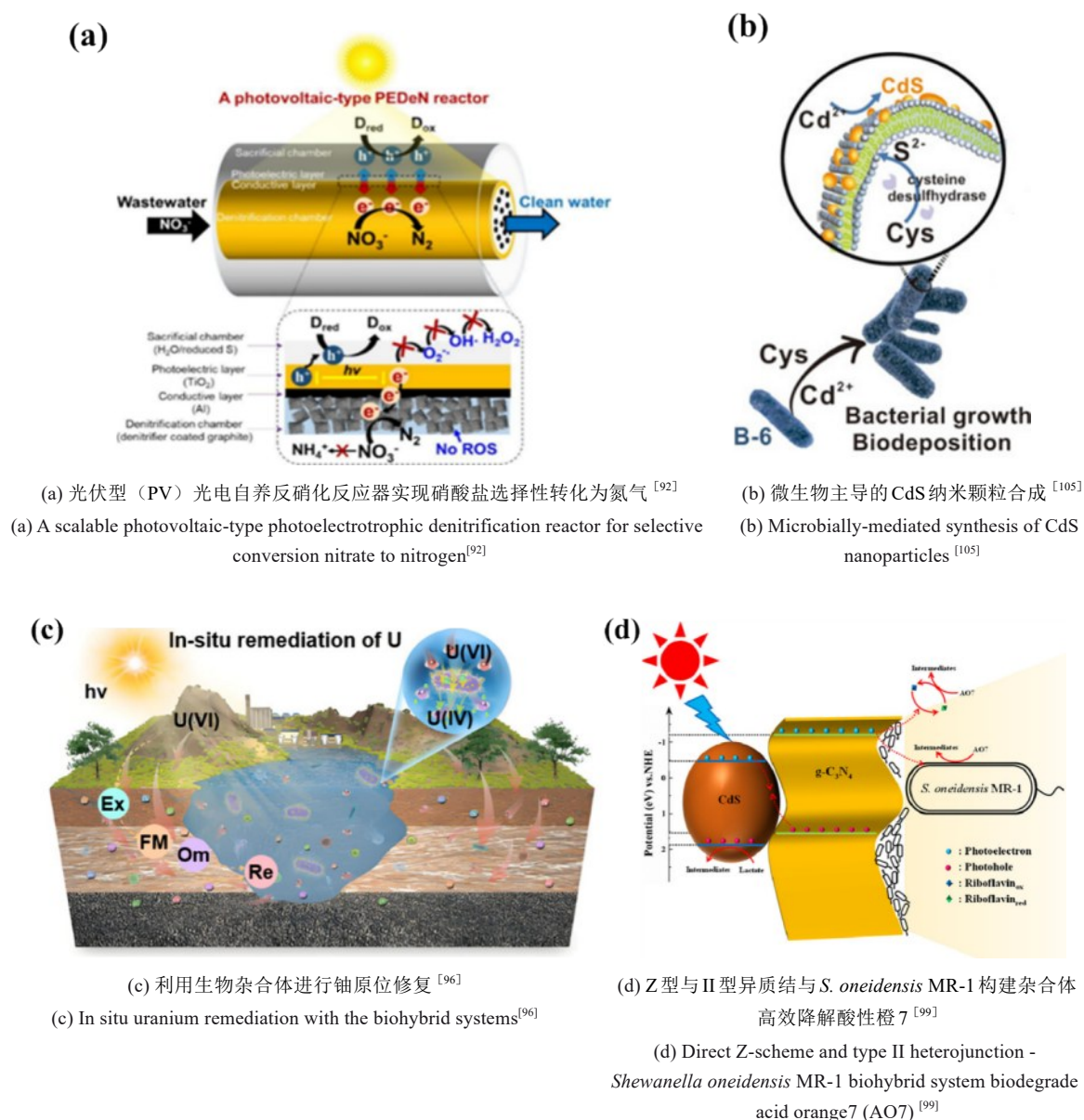


图3 用于污染物去除的代表性纳米材料-微生物杂合体
 Fig. 3 Representative biohybrid systems for pollutant removal

统的活性出现数倍激增。这一“空穴填补”过程不仅有效抑制了光生载流子的复合，还能维持系统的光催化活性。在此反向电子传递构型下，*S. oneidensis* 充当电子供体，而CdS作为电子受体，两者协同促进了难降解抗生素（氯霉素）的持续降解^[113]。该电子反向传输策略不仅能驱动氯霉素、四环素等复杂结构抗生素的持久降解，同样适用于偶氮染料脱色及Cr(VI)光还原等广谱环境修复场景。

4.3 CO₂高值转化

CO₂的高值转化为可再生原料的生产与碳减排开辟了一条可持续的路径^[114]。例如，Ye等构建了*M. barkeri*-CdS光电微生物杂合体，其甲烷生成速率达到了0.19 μmol/h，能量转换效率为0.34%^[115]。然而，纳米材料超快的产电子速率与产甲烷代谢中较慢的电子利用之间存在严重动力学失配，加速了电荷复合并降低了CH₄的产量和选择性。通过

材料改性（如Ni掺杂CdS、NiCu@CdS）及界面工程优化，可显著提升电子利用效率，使CH₄选择性接近100%，量子效率提升至12%以上^[116]。此外，共晶镓铟合金（EGaIn）等新型材料的引入进一步增强了质子耦合电子转移，实现高产率与长周期稳定运行（图4a）^[117]。

除CH₄外，乙酸盐因其极高的工业应用价值及在碳基生物代谢途径中作为核心中间体而备受瞩目^[125, 126]（表2）。经典体系是利用模式产乙酸菌热乙酸穆尔氏菌（*M. thermoacetica*）与原位生物矿化生成的CdS纳米颗粒相偶联^[21]。然而，生物矿化策略常因重金属毒性与纳米颗粒形貌不可控而限制了光生电子-空穴分离效率^[127, 128]。为此，研究者转向体外化学合成策略，成功将金纳米团簇（AuNCs）等纳米材料负载于产乙酸梭菌表面，在温和条件下显著促进了光驱动的CO₂还原，实现了C-C键的高效定向组装^[80]。然而，受限於乙酸盐累积对细胞毒性的影响，早期系统的运行寿命仅为数小时至数天^[21, 80, 121, 129]。为此，Lin等人将*S. oneidensis* MR-1与CdS耦合，利用光照期合成的乙酸盐在黑暗期支持细菌硫呼吸，原位再生了空穴清除剂，实现长达五个月以上的太阳能驱动乙酸盐转化（图4b）^[130]。针对传统纳米光敏剂水氧化动力学慢、依赖外源牺牲试剂（如半胱氨酸）的问题，Yang等人采用TiO₂-Mn酞菁对*M. thermoacetica*-CdS生物杂合体进行功能化修饰，借助半胱氨酸/酞菁氧化还原对介导的电子传递过程，显著提升了光电子转移效率及乙酸盐合成产率^[122]。进一步，研究人员开发了一种“零牺牲剂”平台：将光催化剂（Cr₂O₃/Ru-SrTiO₃；La, Rh|ITO|RuO₂-BiVO₄；Mo）与*S. ovata*巧妙耦合，仅需阳光、CO₂和纯水便成功实现了高选择性的乙酸生成，转化效率高达0.70 ± 0.04%（图4c）^[119]。

除了将CO₂还原为经典的CH₄和乙酸盐之外，研究人员正积极拓展纳米材料-微生物杂合体固碳的化学产物谱。通过特定的“底盘-材料”匹配，已成功合成了甲酸盐与丙酮酸盐（*E. coli*-CdTe）^[131]、苹果酸盐与丁酸盐（*E. coli*-CdS）^[123]、乙偶姻（*R. eutropha*-有机光敏剂）^[132]以及乙烯（*N. spharoides*-InP）^[133]等多种化合物。Nagpal等人更进一步设计了涵盖紫外至近红外全谱吸收的

多功能纳米杂合体（由CdS、CdSe、InP等核壳纳米晶与费氏弧菌、克雷伯氏菌组装而成），在太阳能驱动下实现了将CO₂、空气和水转化为生物燃料（如异丙醇、2, 3-丁二醇）和高值化学品（如甲酸、乙烯）^[81]。

除了上述小分子燃料与基础化学品，纳米材料-微生物杂合体还被广泛应用于将CO₂转化为复杂生物高分子（表2）。例如，基于金属半导体的杂合体（如*C. necator*-CdS）^[134]或非金属光敏剂体系（如*R. eutropha*-g-C₃N₄）^[48, 135]，均已成功实现光驱聚羟基丁酸酯（PHB）的生产，而引入单质硫纳米颗粒兼作空穴清除剂的三元系统，更是将系统的表观量子效率提升至11.8%^[124]。

尽管纳米材料-微生物杂合体已在污染物去除和CO₂转化等领域展现出优异性能，但综合上述案例可以发现，其整体效率仍受到光生载流子复合、界面电子传递受限以及胞内电子利用效率不足等因素的制约。围绕这些关键瓶颈，研究人员发展出了一系列纳米材料工程和微生物工程策略，以强化光捕获能力、促进跨界面电子转移并优化目标代谢过程。因此，下一节将从纳米材料优化和微生物底盘改造两个方面，系统总结提升杂合体性能的主要策略。

5 面向真实环境应用的纳米材料-微生物杂合体优化策略

5.1 能量来源的优化策略

尽管太阳能是驱动纳米材料-微生物杂合体的理想能源，但单一的光驱动模式在实际应用中往往受制于较低的总转换效率与产物产率。这主要由于外源纳米光敏材料的初始捕光阶段以及随后光生载流子跨膜转移过程中的显著能量损耗^[69]。为突破这一热力学与动力学瓶颈，研究人员正积极探索“光主导”的多物理场耦合策略，包括光-热、光-机械、光-水伏耦合等，以降低反应活化能垒并加速跨界面化学转化^[136-139]。在光-热协同中，高能光子激发载流子、低能光子转化为热能，最大化太阳光谱利用率^[140, 141]；例如WS₂等材料通过光热-热释电效应驱动生物脱氮^[142]。在光-机械

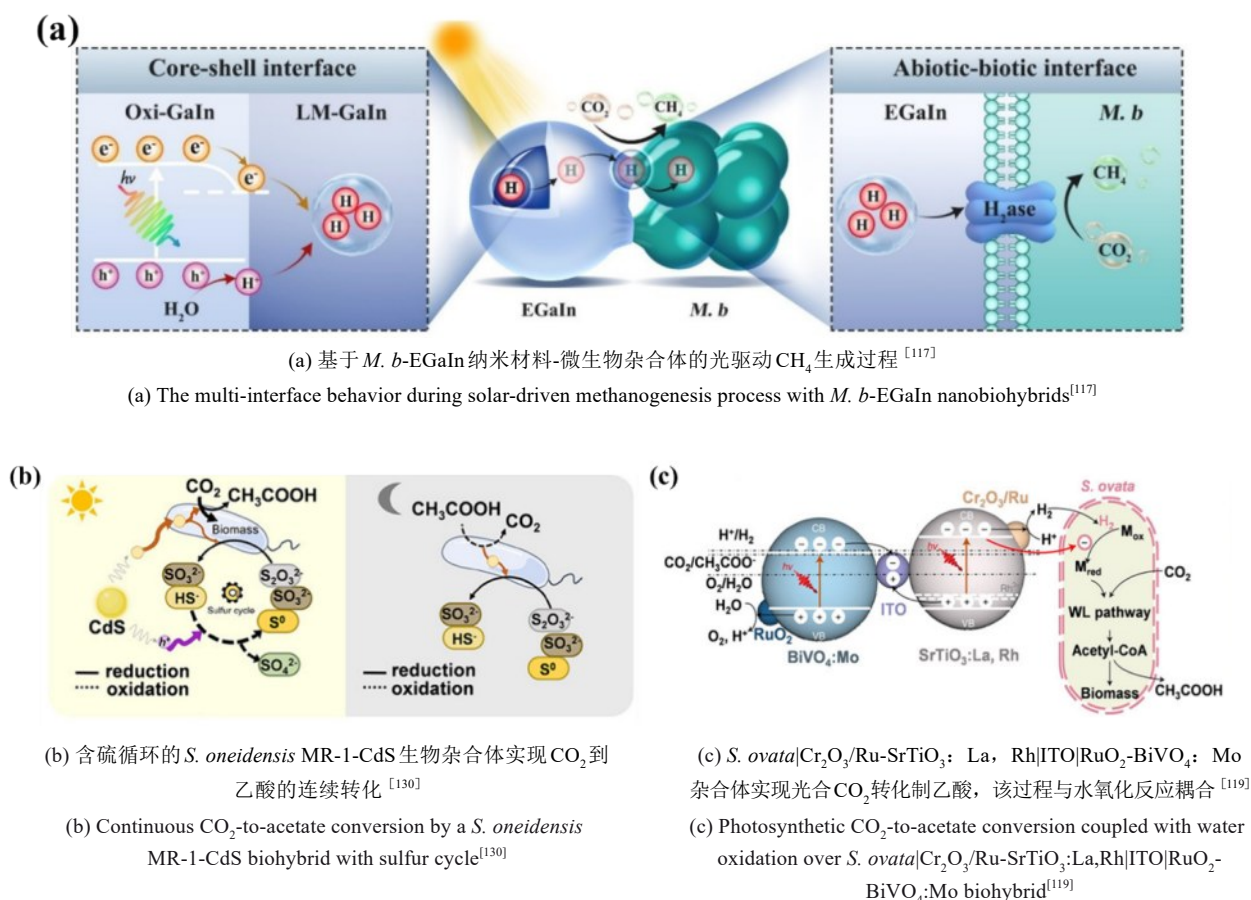


图4 用于 CO_2 转化的代表性纳米材料-微生物杂合体

Fig. 4 Representative biohybrid systems for chemical production

协同中, 压电材料 (如 BaTiO_3) 将机械形变转化为极化电场, 促进电荷分离与电子传递, 已在有机物降解和重金属解毒中实现近 100% 的处理效率^[143, 144]。在光-水协同中, 微生物生物膜利用水分蒸发产生水伏电能, 支撑自身生长与碳固定^[145-147]

与此同时, 能量来源的优化不仅限于多种能量形式的引入, 还需通过光生物反应器的合理设计与光场分布调控, 进一步提高现有能源的捕获与利用效率。为保障光照均匀并降低光能损失, 反应器通常采用平板式、管式或柱状等结构, 并通过设置反射层、导光组件或内部光学增强装置延长有效光程, 使光能充分传递至纳米材料-微生物杂合界面。例如, 平板反应器采用浅腔室结构 (厚度通常 $<5 \text{ mm}$), 配合透明壁面和高反射内壁涂层, 可显著缩短光传播路径和传质距离, 缓解生物物质累积导致的自遮光效应, 同时具有较大的比

表面积和良好的模块化放大潜力^[148]。在传统构型优化的基础上, 新型光传输技术进一步提升了光利用效率。例如, 光学纤维反应器利用侧发光光纤同时作为光传导路径和微生物附着支架, 光线沿纤芯传输并均匀散射至周围杂合体涂层, 实现对纳米材料-微生物杂合体的全长照射, 有效避免高浊度体系中的光衰减^[149]。

5.2 纳米材料的优化策略

受限于相反电荷间的强库仑引力, 光生电子与空穴存在强烈的复合倾向。因此, 无论选用何种纳米光敏材料 (无机或有机), 仅有部分光生电子都能迁移至材料表面从而进入微生物的电子传递链。这种复合不仅发生在纳米材料的体相内部, 即使在材料表面, 它们仍可能在微秒级的时间尺度内发生表面复合, 制约了系统的光能转化效能,

表2 纳米材料-微生物杂合体在 CO₂ 高值转化中的典型应用及性能对比

Table 2 The application and performance comparison of nanomaterial-microorganism biohybrids in the high-value conversion of CO₂

纳米材料类型 Nanomaterial	微生物底盘 Microbes	产物 Products	电子传递路径 Electron transfer	表观量子效率 AQY	牺牲试剂 SED	主要局限 Limitation	参考文献 Ref.
NiCu@CdS	<i>M. barkeri</i>	CH ₄	直接电子转移	12.41%	半胱氨酸	随着光照强度进一步增加,产甲烷性能会急剧下降	[118]
CdS	<i>M. barkeri</i>	CH ₄	无机电子载体(H ₂)	0.34%	半胱氨酸	反应后期牺牲试剂耗尽导致细胞受到光损伤	[115]
Ni(0.75):CdS	<i>M. barkeri</i>	CH ₄	无机电子载体(H ₂)+直接电子转移	2.08%	半胱氨酸	反应后期牺牲试剂耗尽导致细胞受到光损伤	[33]
^{NCN} CNx	<i>M. barkeri</i>	CH ₄	直接电子转移	50.30%	半胱氨酸	持续光照下细胞会受到光损伤	[46]
Cr ₂ O ₃ /Ru-SrTiO ₃ :La, Rh ITO RuO ₂ -BiVO ₄ :Mo	<i>S. ovata</i>	CH ₃ COOH	无机电子载体(H ₂)+直接电子转移	21.30%	否	光催化全片材料的长期运行稳定性不足;材料吸收波长有限	[119]
CdS	<i>S. ovata</i>	CH ₃ COOH	直接电子转移	16.80%	半胱氨酸	体系中 CdS 对细菌有毒性,且强光会造成光氧化损伤,导致部分细胞死亡	[120]
PDI/PFP	<i>M. thermoacetica</i>	CH ₃ COOH	直接电子转移	1.60%	半胱氨酸	该系统必须依赖外部添加的空穴牺牲剂	[121]
CdS	<i>M. thermoacetica</i>	CH ₃ COOH	直接电子转移	2.44%	半胱氨酸	生物矿化策略常因重金属毒性与乙酸盐累积对细胞有毒性	[21]
TiO ₂ -Mn(II)酞菁+CdS	<i>M. thermoacetica</i>	CH ₃ COOH	直接电子转移		半胱氨酸	氧气积累的抑制效应	[122]
CdS	工程化 <i>E. coli</i>	L-苹果酸、丁酸	直接电子转移			后期细胞活性逐渐衰减	[123]
g-C ₃ N ₄ 纳米片	<i>R. eutropha</i>	PHB	无机电子载体(H ₂)	5.81%	否	长期运行后 PHB 产量下降	[49]
单质硫纳米颗粒(SNPs)-g-C ₃ N ₄	<i>R. palustris</i>	PHB	直接电子转移	11.80%	单质硫兼作牺牲试剂	SNPs 对细菌有潜在毒性	[124]

注: PHB—聚羟基丁酸酯; PDI—茚二酰亚胺衍生物; PFP—聚(芴-共-亚苯基)。

更成为了阻碍该类杂合体从实验室纯培养条件迈向真实环境应用的核心瓶颈。

针对上述瓶颈,表面掺杂与缺陷工程已成为提升杂合体在复杂环境中鲁棒性与光电性能的有效微观调控策略。这些修饰手段不仅能通过引入电子或空穴捕获位点来有效抑制电荷的体相复合,还能调节材料的本征能带结构、拓宽光谱吸收范围,使其能够更高效地捕获宽频带的自然太阳光^[150, 151]。在金属体系中,Ye等人率先将Ni原子掺入CdS晶格,显著优化了其光电子动力学行为并加速了跨界面的电子转移^[33]。类似地,其他金属基掺杂体系(如Zn掺杂CdS^[152]、Mo掺杂BiVO₄^[119])也被证实能有效促进电荷分离。除改善电荷动力学外,杂原子掺杂还能优化材料的局域电子结构以增加活性反应位点(例如Ni掺杂的

Zn_{1.2}Ga_{1.6}Ge_{0.2}O₄与沼泽红假单胞菌*R. palustris*的杂合体系)。在非金属体系中,O掺杂g-C₃N₄与红球菌属的偶联^[153],以及N掺杂碳量子点与保加利亚乳杆菌的整合^[154],均成功应用于高性能杂合体的构建。这充分印证了掺杂工程在优化非生物-生物界面中的多功能性与普适性。除元素掺杂外,引入表面缺陷亦能发挥优势互补甚至协同增强的作用。表面缺陷不仅可作为电子捕获中心,在抑制体相复合、促进电荷分离的同时,还能有效调节能带结构、拓宽光响应范围,增强纳米材料在光照波动环境下的适应性,并优化跨界面氧化还原反应的能级匹配^[155]。例如,氧空位(V_o)作为常见的表面缺陷,被证实能显著增强氢化TiO₂-微藻杂合体系中的电荷迁移能力^[40]。同样,在TiO₂导带中引入由V_o诱导的缺陷能级,可大幅提升其可

见光吸收与电荷分离效率^[156]。

在宏观结构上,构建半导体异质结可进一步提升纳米材料-微生物杂合体能量转化的效率。该构型不仅能有效促进光生载流子的空间分离、拓宽光谱响应范围,还能通过引导电子定向转移,在抑制电荷复合的同时维持体系的高氧化还原电势^[157]。大量研究已印证了此策略在驱动各类微生物代谢中的卓越表现,如AgInS₂/In₂S₃异质结驱动*E. coli*产氢^[44]、InP/ZnSe/ZnS结合卵形孢囊菌还原CO₂产乙酸等^[158]。在此基础之上,全固态Z型异质结构则进一步摆脱了对外部有机牺牲试剂的依赖,极大地契合了真实水体或工业废水的原位处理需求。例如,串联Z型异质结的杂合体(*M. thermoacetica*-CdS)可在光照下驱动CO₂还原为乙酸并偶联半胱氨酸氧化;与此同时,TiO₂-酞菁锰(II)复合物通过吸收光能将氧化产物重新还原,并将H₂O氧化为O₂^[122]。这种设计在无牺牲试剂的条件下闭合了氧化还原循环,为实现低成本、长效运行的规模化应用奠定了坚实基础。

5.3 微生物底盘的优化策略

为克服界面电子转移固有的低效问题,前沿研究正着力于借助基因重编程策略,全面优化光生电子从纳米材料向胞内氧化还原酶定向输运的效率与特异性^[159, 160]。以*E. coli*为例,其天然的[FeFe]-氢化酶与光生电子匹配度较差;通过异源表达具有良好氧化还原匹配度的[FeFe]-氢化酶(HydA)及其成熟蛋白,研究者成功为光驱动电子转移构建了一条更为直接、高效的传输通道^[161]。在此类元件挖掘过程中可辅以基于机器学习的序列-功能预测,从而快速筛选出与纳米材料兼容性更高的氧化还原酶变体。此外,调节胞内的氧化还原环境也能显著提升电子传递效率。例如,异源表达来源于希瓦氏菌的小型四血红素细胞色素CctA,可有效促进电子从周质向细胞质的传输^[162]。此外,还可基于CRISPR干扰(CRISPRi)实现内源竞争通路的可逆抑制,从而进一步优化电子的流向。

另一方面,提高纳米材料与酶之间的空间邻近性对于最小化电子隧穿距离、最大化电子传递

效率同样至关重要^[163]。为此,研究人员利用含内在无序结构域(IDDs)的融合蛋白发生液-液相分离(LLPS)开发了自组装蛋白质架构。例如,源自蜘蛛丝的MaSp18融合蛋白能够通过自组装,将金纳米颗粒(AuNP)与氢化酶紧密共定位的特殊微区室^[164]。光照激发时,该凝聚体不仅介导了由AuNP至酶的直接电子转移,还成功绕开了胞内可溶性介体及NADH/NAD⁺循环网络,显著提升了系统的整体催化活性。作为补充,表面特异性酶靶向技术为在纳米颗粒与催化蛋白间构建直接、高效的物理界面提供了模块化方案。例如,组氨酸标签介导可将磷酸戊糖途径限速酶(6-磷酸葡萄糖脱氢酶)精准锚定于CdSe@ZnS量子点表面,不仅产生了更强的催化电流,还显著改善了辅酶的周转率^[129]。这些策略为克服胞内电子传递瓶颈提供了坚实的技术框架。

靶向代谢调控是推动纳米材料-微生物杂合体向多维功能拓展的基石,可有效拓宽底物利用范围、提升生物合成效率,并支撑杂合体功能的可持续性^[165, 166]。其中,一项核心策略是引入异源分解代谢与生物合成途径,从而克服天然代谢的局限性并实现非天然的生化转化。例如,表达甲酸脱氢酶的*E. coli*能够利用CdS纳米颗粒提供的光生电子将CO₂高效转化为甲酸^[167]。在古菌系统中,无法代谢葡萄糖的嗜乙酸甲烷八叠球菌(*M. acetivorans* C2A)经改造引入葡萄糖共转运蛋白和激酶基因,则显著改善了底物同化能力,耦合CdS后其甲烷产量显著提升^[166]。此外,引入异源合成途径还能在温和条件下驱动复杂化合物的光促合成。例如,将*bdh*基因簇和LysR型调节因子整合至需钠弧菌-CdS杂合体中,实现了废水生物质向2,3-丁二醇的直接转化^[166]。对于此类代谢线路的迭代优化,生物传感器辅助的适应性进化能够动态监测胞内代谢物水平,加速获得高产表型。除引入异源途径之外,研究人员还通过基因组编辑对微生物进行深度重编程,以构建人工代谢路线。例如,通过对*R. palustris*中的*nifD*基因进行定点突变,构建了非天然的产甲烷途径,实现了胞内CO₂向甲烷的转化^[168]。

为进一步拓宽系统功能边界,研究人员在单菌株系统的基础上,开发了由纳米光敏剂与微生

物群落组成的合成代谢网络。这种设计实现了任务分工与模块化隔离。例如,将 *S. ovata* 与工程化的 *R. palustris* (nifA*突变体) 共培养并结合硅纳米线:在光驱动下,前者负责将 CO_2 还原为乙酸,后者则以此为底物完成固氮和 PHB 合成^[169]。此外,将全细胞与酶功能化纳米材料相耦合的混合生物催化系统也开始涌现^[170]。与单菌株系统相比,合成菌群在实现复杂功能时具有更高的模块化潜力,但在稳定性、可控性和改造难度上面临更大挑战:合成菌群的动态平衡极易受到交叉喂养代谢扰动的影响,且在实际运行中存在光生电子向非目标菌株泄漏、种间电子竞争以及长期共存下的基因水平转移等特有风险。因此,尽管从单菌株到微生物群落的合理设计展现出了极大的可持续发展潜力,未来仍需结合空间结构调控策略(如微流控、生物膜工程和隔离载体设计)与多组学解析技术,实现复杂微生态网络中电子流、代谢流和群落组成的协同调控,从而提升系统的长期稳定性、生态鲁棒性与功能可预测性。

6 面临的挑战与未来展望

尽管纳米材料-微生物杂合体在环境领域已展现出巨大应用潜力,但从概念验证走向实际应用仍面临多重瓶颈。为充分发挥该技术的潜能,必须从技术经济、标准化与安全、智能化与应用拓展等方面突破原有的局限,以期彻底跨越从实验室概念验证到实际工业应用的转化鸿沟。

6.1 技术经济与环境适应性挑战

纳米材料-微生物杂合体从实验室纯水模型走向实际环境工程应用(如大规模废水处理与水体生态修复)面临的核心挑战之一是技术经济壁垒。这首先体现在纳米光敏材料的高耗能、高成本合成。例如, CdS 和 CdTe 等纳米光敏材料的合成通常需要投入高达 300 至 600 MJ/kg 的能量^[171]。其次,无论无机量子点还是有机聚合物,在富氧、水相或持续光照条件下均易发生化学降解与光腐蚀脱落^[172, 173]。虽然添加牺牲电子供体可部分缓解界面降解,但其高昂成本进一步推高了系统总造

价^[174]。此外,微观上纳米材料超快产电子与环境微生物缓慢耗电子间的“动力学错配”,导致体系的太阳能转化与污染物降解效率普遍偏低^[175]。

更为重要的是,目前绝大多数纳米材料-微生物杂合体研究仍停留在实验室纯培养体系或模拟废水条件下,而真实环境中的复杂基质效应可能显著削弱其性能。例如, $\text{CdSe}_x\text{S}_{1-x}$ -*P. aeruginosa* 杂合体对实验室模拟废水中硝酸盐的去除率高达 99.8%,但在处理实际市政污水、养殖废水和电镀废水时,去除率分别下降至 73.5%、82.8% 和 62.6%^[94]。一方面,实际废水或地表水中普遍存在高浓度悬浮颗粒物和胶体,会通过散射和吸收作用显著削减有效光通量,削弱纳米材料的光激发效率,进而减少可用于微生物的光生电子数量;同时,自然光照存在昼夜交替和阴雨天的周期性波动,这种间歇性光照模式可能导致光生电子供给不连续,与微生物相对连续的电子消耗需求之间产生新的动力学失配,迫使微生物依赖胞内储能物质、电子储库或其他代谢途径维持生理活动,降低目标修复功能的稳定性^[176]。另一方面,共存物质的竞争与干扰同样不容忽视:天然有机质(如腐殖酸、富里酸)不仅会竞争吸收光子、降低光量子产率,还可吸附于纳米材料表面、占据活性位点或淬灭光生载流子,从而削弱纳米材料与微生物之间的界面电子传递效率;高浓度氯离子及其他卤素阴离子可能通过捕获空穴、改变界面电荷环境及离子强度,从而影响电子转移效率和污染物转化路径;废水中的共存电子受体(如溶解氧、高价态重金属离子)可能与目标反应竞争电子流。上述挑战大幅增加了光生物反应器设计的复杂度与运维能耗^[177, 178]。

为跨越上述技术经济壁垒,未来的技术开发可聚焦于“降本增效”与“环境韧性提升”。例如,可利用自然生境中广泛存在的天然廉价光敏物质(如水土界面中的溶解/颗粒态有机质,或天然矿物 TiO_2)或重金属废水中的有害离子的原位生物矿化,以实现低成本反应器的自组装,从而降低运行成本。或是,通过负载纳米酶等保护层淬灭 ROS,并引入异质结加速电荷分离以弥合动力学鸿沟,从而提升系统环境韧性。此外,还应建立从实验室模拟体系、实际废水验证到中试反

应器评估的多层级评价体系,在实际废水、地表水和土壤环境中系统考察复杂基质对杂合体稳定性和功能表现的影响,为工程化应用提供可靠依据。

6.2 生态安全监管

纳米材料-微生物杂合体在开放生态系统中的环境风险与生态安全评估同样亟待重视。当前,高毒性无机纳米材料沿食物链的生物富集,工程菌与环境土著野生菌群间发生“水平基因转移”造成的生物污染,以及纳米材料长期暴露诱发的微生物抗药性突变,共同构成了杂合体的核心生态隐患^[179, 180]。这种由纳米材料与活体微生物深度耦合所引起的新型复合风险已然超出了传统单一监管框架的覆盖范畴,凸显了在开放生态系统中全面开展杂合体环境风险评估的紧迫性。

为应对工程菌的生物安全风险,目前已发展出多种防控策略。例如,通过敲除工程菌中必需代谢通路的关键基因构建营养缺陷型菌株,使其必须依赖环境中不存在的人工供给代谢物(如特定氨基酸或核酸前体)才能存活,从而严格限制其在自然环境中的生存;亦可引入由环境信号(如温度、pH、特定化学诱导物)触发的毒素-抗毒素系统或自杀基因开关,在工程菌离开指定作业区域时激活毒性蛋白表达,诱导细胞程序性死亡,实现多重保障。此外,还可引入非天然氨基酸-正交tRNA合成酶系统与正交复制系统,将工程菌的遗传信息流替换为天然环境中不存在的生化逻辑,使工程菌基因无法被天然微生物的转录翻译机制所识别和表达,从根本上阻断水平基因转移。

从纳米材料的角度,现有的标准化毒理测试无法真实反映杂合体在复杂环境介质(复杂的pH、离子强度、天然有机质)中的动态行为,导致其全生命周期风险的量化评估极为困难。因此,亟需产业界、监管机构、环境毒理学家以及科研人员尽早开展跨界协同与前瞻性布局,为纳米材料-微生物杂合体量身定制科学、严密的监管框架。

6.3 应用场景多元化扩展及数字技术融合

随着材料科学、微生物技术和光电子学的进一步发展,纳米材料-微生物杂合体的应用正突破

传统的污染物降解与固碳,向更广阔、更多元的复杂环境场景加速延伸。例如,通过强化胞外电子传递网络,该体系可实现富磷废水中的磷酸盐高效矿化回收(如生成高价值的鸟粪石)^[181];利用死亡微藻与底泥电活性菌的光电互营机制,可实现对重金属与难降解有机物复合污染水土生境的原位生态修复^[182];此外,该技术还展现出向下游延伸的巨大潜力,包括开发用于新污染物实时在线监测的光电生物传感器,以及驱动农业废弃物(如秸秆、畜禽粪便)向生物肥料与生物炭的高值化转化。

然而,将纳米材料-微生物杂合体从实验室推向开放、高度异质化的真实环境时,不可避免地面临由“环境条件-底物-纳米材料-微生物”构成的极高维、非线性系统挑战。真实环境中的水质波动、昼夜光照交替以及共存底物竞争,使得传统的环境工程“试错法”难以应对。为打破这一瓶颈,深度引入智能化数字技术已成为必然趋势。其中,人工智能(AI)与机器学习(ML)为应对杂合系统设计中高维、非线性的优化难题提供了变革性策略。在由材料组分、微生物特征及运行环境构成的庞大组合中,ML算法能够从正向成功案例及过往被忽视的负面失败数据中最大化提取科学信息,精准识别潜在规律,从而揭示杂合体在真实环境中的底层生态适应性机制,并预测针对特定生态修复目标的最佳环境调控与系统配置方案^[183, 184]。除AI技术外,数字孪生(Digital Twin)技术有望为纳米材料-微生物杂合系统构建动态虚拟映射体,通过融合材料性质、微生物代谢过程及环境运行参数等多源信息,实现系统性能预测、运行状态诊断和智能控制^[185]。借助虚拟环境中的情景模拟与参数寻优,数字孪生可降低工程放大过程中的试验成本,并提高系统运行的稳定性与适应性。然而,上述数字化技术的应用高度依赖多源异构数据的持续积累与共享,由此也带来了数据标准化、存储管理、数据安全及知识产权保护等挑战。因此,未来仍需建立统一的数据管理体系、安全高效的数据传输架构以及透明可信的人机交互机制,为纳米材料-微生物杂合体系的智能化设计、规模化应用和可持续发展提供支撑。

参 考 文 献

- [1] FARGHALI M, OSMAN A I, MOHAMED I M, et al. Strategies to save energy in the context of the energy crisis: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(4): 2003.
- [2] CAMPA M F, BROWN C M, BYRLEY P, et al. Nanotechnology solutions for the climate crisis[J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19(10): 1422.
- [3] OBAIDEEN K, OLABI A G, AL SWAILMEEN Y, et al. Solar energy: applications, trends analysis, bibliometric analysis and research contribution to sustainable development goals (SDGs) [J]. *Sustainability*, 2023, 15(2): 1418.
- [4] KABIR E, KUMAR P, KUMAR S, et al. Solar energy: potential and future prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82(1): 894.
- [5] ÉVA C, OSZVALD M, TAMÁS L. Current and possible approaches for improving photosynthetic efficiency[J]. *Plant Science*, 2019, 280: 433.
- [6] ZHU X G, LONG S P, ORT D R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2008, 19 (2): 153.
- [7] BLANKENSHIP R E, TIEDE D M, BARBER J, et al. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement[J]. *Science*, 2011, 332(6031): 805.
- [8] SHEN L, YIN X. Solar spectral management for natural photosynthesis: from photonics designs to potential applications[J]. *Nano Conver.*, 2022, 9(1): 36.
- [9] REYES CRUZ E A, NISHIORI D, WADSWORTH B L, et al. Molecular-modified photocathodes for applications in artificial photosynthesis and solar-to-fuel technologies[J]. *Chemical Reviews*, 2022, 122(21): 16051.
- [10] ZHANG B, SUN L. Artificial photosynthesis: opportunities and challenges of molecular catalysts[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(7): 2216.
- [11] WANG Z, HU Y, ZHANG S, et al. Artificial photosynthesis systems for solar energy conversion and storage: platforms and their realities[J]. *Chemical Society Reviews*, 2022, 51(15): 6704.
- [12] KIM D, SAKIMOTO K K, HONG D, et al. Artificial photosynthesis for sustainable fuel and chemical production[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(11): 3259.
- [13] XIAO K, LIANG J, WANG X, et al. Panoramic insights into semi-artificial photosynthesis: origin, development, and future perspective[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15 (2): 529.
- [14] OKORO G, HUSAIN S, SAUKANI M, et al. Emerging trends in nanomaterials for photosynthetic biohybrid systems[J]. *ACS Materials Letters*, 2023, 5(1): 95.
- [15] CESTELLOS-BLANCO S, ZHANG H, KIM J M, et al. Photosynthetic semiconductor biohybrids for solar-driven biocatalysis[J]. *Nature Catalysis*, 2020, 3(3): 245.
- [16] FAN G, WASUWANICH P, FURST A L. Biohybrid systems for improved bioinspired, energy-relevant catalysis[J]. *ChemBioChem.*, 2021, 22(14): 2353.
- [17] LI L, XU Z, HUANG X. Whole-cell-based photosynthetic biohybrid systems for energy and environmental applications [J]. *ChemPlusChem*, 2021, 86(7): 1021.
- [18] SHEN J, LIU Y, QIAO L. Photodriven chemical synthesis by whole-cell-based biohybrid systems: from system construction to mechanism study[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(5): 6235.
- [19] KRASNOVSKY A A, NIKANDROV V V. The photobiocatalytic system: Inorganic semiconductors coupled to bacterial cells[J]. *FEBS Letters*, 1987, 219(1): 93-96.
- [20] LU A, LI Y, JIN S, et al. Growth of non-phototrophic microorganisms using solar energy through mineral photocatalysis[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 768.
- [21] SAKIMOTO K K, WONG A B, YANG P. Self-photosensitization of nonphotosynthetic bacteria for solar-to-chemical production[J]. *Science*, 2016, 351(6268): 74-77.
- [22] GUO J, SUÁSTEGUI M, SAKIMOTO K K, et al. Light-driven fine chemical production in yeast biohybrids[J]. *Science*, 2018, 362(6416): 813-816.
- [23] YE J, GU W, HU J, et al. Toward Next-Generation Semiartificial Photosynthesis: Multidisciplinary Engineering of Biohybrid Systems[J]. *Chemical Reviews*, 2025, 125(24): 12198-12252.
- [24] WANG L, YU J. Chapter 1 - Principles of photocatalysis[M]. J. Yu, L. Zhang, L. Wang and B. Zhu. Elsevier, 2023: 1-52
- [25] BROWN K A, KING P W. Coupling biology to synthetic nanomaterials for semi-artificial photosynthesis[J]. *Photosynthesis Research*, 2020, 143(2): 193.
- [26] HOFFMANN M R, MARTIN S T, CHOI W, et al. Environmental applications of semiconductor photocatalysis [J]. *Chemical Reviews*, 1995, 95(1): 69.
- [27] LU A, LIU J, XU M, et al. Novel energy utilization mechanisms of microorganisms in the hydrosphere[J]. *Fundamental Research*, 2025, 5(4): 1584.
- [28] CHEN S, CHEN J, ZHANG L, et al. Biophotocatalytic process co-driven by dead microalgae and live bacteria[J]. *ISME Journal*, 2023, 17(5): 712.
- [29] ZHANG W, XIONG C, CHEN P, et al. Elucidating energy conversion pathways at biotic/abiotic interfaces in microbe-semiconductor hybrids[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(24): 20171.
- [30] JIANG Y, TIAN B. Inorganic semiconductor biointerfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(12): 473.
- [31] GARCÍA DE ARQUER F P, TALAPIN D V, KLIMOV V I, et al. Semiconductor quantum dots: technological progress and future challenges[J]. *Science*, 2021, 373(6555): eaaz8541.

- [32] LI X, TUNG C, WU L. Semiconducting quantum dots for artificial photosynthesis[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2018, 2(8): 160.
- [33] YE J, REN G, KANG L, et al. Efficient photoelectron capture by Ni decoration in *Methanosarcina barkeri*-CdS biohybrids for enhanced photocatalytic CO₂-to-CH₄ conversion[J]. *iScience*, 2020, 23(7): 101287.
- [34] YI X, LIU S, LUO M, et al. An outer membrane photosensitized *Geobacter sulfurreducens*-CdS biohybrid for redox transformation of Cr (VI) and tetracycline[J]. *Journal of Hazardous materials*, 2022, 431: 128633.
- [35] WANG B, JIANG Z, YU J C, et al. Enhanced CO₂ reduction and valuable C₂⁺ chemical production by a CdS-photosynthetic hybrid system[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(19): 9296.
- [36] PRIYANKA U, LENS P N. Enhanced removal of hydrocarbons BTX by light-driven *Aspergillus niger* ZnS nanobiohybrids[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2022, 157: 110020.
- [37] FENG Y, XU M, TREMBLAY P L, et al. The one-pot synthesis of a ZnSe/ZnS photocatalyst for H₂ evolution and microbial bioproduction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(42): 21901.
- [38] PRIYANKA U, LENS P N. Light driven *Aspergillus niger*-ZnS nanobiohybrids for degradation of methyl orange[J]. *Chemosphere*, 2022, 298: 134162.
- [39] CHEN S, SHI N, HUANG M, et al. MoS₂ nanosheets-cyanobacteria interaction: Reprogrammed carbon and nitrogen metabolism[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(10): 16344.
- [40] MAO J, AN X, GU Z, et al. Visualizing the interfacial charge transfer between photoactive *Microcystis aeruginosa* and hydrogenated TiO₂[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2020, 54(16): 10323.
- [41] PAN X, LI W, FANG Y, et al. Semi-artificial photosynthetic system based on TiO₂/Chlorophyll composite and microalgae for N₂ fixation[J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 475: 146179.
- [42] HONDA Y, WATANABE M, HAGIWARA H, et al. Inorganic/whole-cell biohybrid photocatalyst for highly efficient hydrogen production from water[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2017, 210: 400.
- [43] ZHOU J, YANG Y, ZHANG C. Toward biocompatible semiconductor quantum dots: from biosynthesis and bioconjugation to biomedical application[J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(21): 11669.
- [44] JIANG Z, WANG B, YU J C, et al. AgInS₂/In₂S₃ heterostructure sensitization of *Escherichia coli* for sustainable hydrogen production[J]. *Nano Energy*, 2018, 46: 234.
- [45] LIU J, LIU Y, LIU N, et al. Metal-free efficient photocatalyst for stable visible water splitting via a two-electron pathway[J]. *Science*, 2015, 347(6225): 970.
- [46] HU A, YE J, REN G, et al. Metal-free semiconductor-based bio-nano hybrids for sustainable CO₂-to-CH₄ conversion with high quantum yield[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 61(35): e202206508.
- [47] HU A, FU T, REN G, et al. Sustained biotic-abiotic hybrids methanogenesis enabled using metal-free black phosphorus/carbon nitride[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 957066.
- [48] TREMBLAY P, XU M, CHEN Y, et al. Nonmetallic abiotic-biological hybrid photocatalyst for visible water splitting and carbon dioxide reduction[J]. *iScience*, 2020, 23(1): 100784.
- [49] WANG W, ZHANG H, GUO M, et al. Photodriven carbon nitride nanosheet-bacterium biohybrid with an encapsulation structure for CO₂ to C₄ Bioplastic conversion[J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2025, 13(19): 7043.
- [50] KALATHIL S, RAHAMAN M, LAM E, et al. Solar-driven methanogenesis through microbial ecosystem engineering on carbon nitride[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(48): e202409192.
- [51] KESSLER F K, ZHENG Y, SCHWARZ D, et al. Functional carbon nitride materials—design strategies for electrochemical devices[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(6): 1.
- [52] LIU J, HU R, LIU J, et al. Cytotoxicity assessment of functionalized CdSe, CdTe and InP quantum dots in two human cancer cell models[J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2015, 57(1): 222.
- [53] SAKIMOTO K K, KORNIENKO N, CESTELLOS BLANCO S, et al. Physical biology of the materials-microorganism interface[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(6): 1978.
- [54] CHEN W, LIN H, YU W, et al. Organic semiconducting polymers for augmenting biosynthesis and bioconversion[J]. *JACS Au*, 2024, 4(1): 3.
- [55] QI R, ZHAO H, ZHOU X, et al. In situ synthesis of photoactive polymers on a living cell surface via bio-palladium catalysis for modulating biological functions[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 133(11): 5823.
- [56] DAI C, PAN Y, LIU B. Conjugated polymer nanomaterials for solar water splitting[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(42): 2002474.
- [57] SU D, QI J, LIU X, et al. Enzyme-modulated anaerobic encapsulation of *Chlorella* cells allows switching from O₂ to H₂ production[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 131(12): 4032.
- [58] CHEN N, SHEN R, HE T, et al. A photosynthesis-derived bionic system for sustainable biosynthesis[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 137(7): e202414981.
- [59] ZHANG M, TIAN Y, XU D, et al. Modular design and integrated construction of photosynthetic biohybrids for solar-driven CO₂ conversion to chemicals[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2025, 540: 216774.
- [60] YU W, ZENG Y, WANG Z, et al. Solar-powered multi-organism symbiont mimic system for beyond natural synthesis

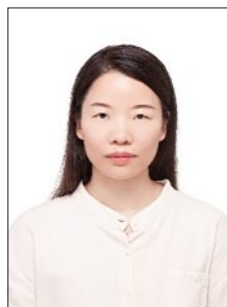
- of polypeptides from CO₂ and N₂[J]. *Science Advances*, 2023, 9(11): eadf6772.
- [61] FANG X, KALATHIL S, REISNER E. Semi-biological approaches to solar-to-chemical conversion[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(14): 4926.
- [62] YE J, CHEN Y, GAO C, et al. Sustainable conversion of microplastics to methane with ultrahigh selectivity by a biotic-abiotic hybrid photocatalytic system[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2022, 134(52): e202213244.
- [63] HAN G H, BANG J, PARK G, et al. Recent advances in electrochemical, photochemical, and photoelectrochemical reduction of CO₂ to C₂⁺ products[J]. *Small*, 2023, 19(16): 2205765.
- [64] PAN Q, TIAN X, LI J, et al. Interfacial electron transfer for carbon dioxide valorization in hybrid inorganic-microbial systems[J]. *Applied Energy*, 2021, 292: 116885.
- [65] MULKIDJANIAN A Y, KOONIN E V, MAKAROVA K S, et al. The cyanobacterial genome core and the origin of photosynthesis[J]. *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(35): 13126.
- [66] SONG W, ZHANG X, LI W, et al. Engineering biotic-abiotic hybrid systems for solar-to-chemical conversion[J]. *Chem.*, 2025, 11(2): 102351.
- [67] CHEN M, ZHOU X, YU Y, et al. Light-driven nitrous oxide production via autotrophic denitrification by self-photosensitized *Thiobacillus denitrificans*[J]. *Environment International*, 2019, 127: 353.
- [68] ZHOU X, HUANG S, CHEN X, et al. Mechanisms of extracellular photoelectron uptake by a *Thiobacillus denitrificans*-cadmium sulfide biosemiconductor system[J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 468: 143667.
- [69] THAUER R K, KASTER A, SEEDORF H, et al. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, 6(8): 579.
- [70] KULKARNI G, KRIDELBAUGH D M, GUSS A M, et al. Hydrogen is a preferred intermediate in the energy-conserving electron transport chain of *Methanosarcina barkeri*[J]. *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(37): 15915.
- [71] KULKARNI G, MAND T D, METCALF W W. Energy conservation via hydrogen cycling in the methanogenic archaeon *Methanosarcina barkeri*[J]. *MBio*, 2018, 9(4): e01256.
- [72] SEDENHO G C, MODENEZ I, MENDES G R, et al. The role of extracellular polymeric substance matrix on *Saccharomyces cerevisiae* bioelectricity[J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 393: 139080.
- [73] JAHN M, CRANG N, GYNNÄ A H, et al. The energy metabolism of *Cupriavidus necator* in different trophic conditions[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2024, 90(10): e00748-00724.
- [74] ROSENBAUM F P, MÜLLER V. *Moorella thermoacetica*: a promising cytochrome-and quinone-containing acetogenic bacterium as platform for a CO₂-based bioeconomy[J]. *Green Carbon*, 2023, 1(1): 2.
- [75] CONG Y, WANG X, BAI H, et al. Intracellular gold nanocluster/organic semiconductor heterostructure for enhancing photosynthesis[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 136(48): e202406527.
- [76] YI F, YANG L, ZHANG L, et al. Enhanced photosynthetic carbon fixation in microalgae through tandem synergies in electron transport flows[J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 512: 162505.
- [77] ZENG Y, ZHOU X, QI R, et al. Photoactive conjugated polymer-based hybrid biosystems for enhancing cyanobacterial photosynthesis and regulating redox state of protein[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(8): 2007814.
- [78] ZHOU X, ZENG Y, LV F, et al. Organic semiconductor-organism interfaces for augmenting natural and artificial photosynthesis[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2022, 55(2): 156.
- [79] HU Q, HU H, CUI L, et al. Ultrafast electron transfer in *Au*-cyanobacteria hybrid for solar to chemical production[J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8(1): 677.
- [80] ZHANG H, LIU H, TIAN Z, et al. Bacteria photosensitized by intracellular gold nanoclusters for solar fuel production[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(10): 900.
- [81] DING Y, BERTRAM J R, ECKERT C, et al. Nanorg microbial factories: light-driven renewable biochemical synthesis using quantum dot-bacteria nanobiohybrids[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, 141(26): 10272.
- [82] ARAUZO M. Vulnerability of groundwater resources to nitrate pollution: a simple and effective procedure for delimiting nitrate vulnerable zones[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 799.
- [83] SPOSOB M, BAKKE R, DINAMARCA C. Metabolic divergence in simultaneous biological removal of nitrate and sulfide for elemental sulfur production under temperature stress [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 233: 209.
- [84] YANG T, DOUDRICK K, WESTERHOFF P. Photocatalytic reduction of nitrate using titanium dioxide for regeneration of ion exchange brine[J]. *Water Research*, 2013, 47(3): 1299.
- [85] VAGNETTI R, MIANA P, FABRIS M, et al. Self-purification ability of a resurgence stream[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(10): 1781.
- [86] MING J, NI S, GUO Z, et al. Photocatalytic material-microorganism hybrid systems in water decontamination[J]. *Trends in Biotechnology*, 2025, 43(5): 1031.
- [87] CHEN X, FENG Q, CAI Q, et al. Mn₃O₄ nanzyme coating accelerates nitrate reduction and decreases N₂O emission during photoelectrotrophic denitrification by *Thiobacillus denitrificans*-CdS[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2020, 54(17): 1031.

- 10820.
- [88] HUANG S, CHEN M, DIAO Y, et al. Dissolved organic matter acting as a microbial photosensitizer drives photoelectrotrophic denitrification[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2022, 56(7): 4632.
- [89] HUANG S, CHEN K, CHEN X, et al. Sunlight significantly enhances soil denitrification via an interfacial biophotoelectrochemical pathway[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2023, 57(20): 7733.
- [90] FU H, YUAN J, GAO H. Microbial oxidative stress response: novel insights from environmental facultative anaerobic bacteria[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2015, 584: 28.
- [91] LI Y, ZHANG W, NIU J, et al. Mechanism of photogenerated reactive oxygen species and correlation with the antibacterial properties of engineered metal-oxide nanoparticles[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(6): 5164.
- [92] CHEN M, CHEN K, LI Y, et al. A scalable photovoltaic-type photoelectrotrophic denitrification reactor for selective conversion nitrate to nitrogen via isolating reactive oxygen species[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 507: 160816.
- [93] CHEN M, CAI Q, CHEN X, et al. Anthraquinone-2-Sulfonate as a Microbial Photosensitizer and Capacitor Drives Solar-to-N₂O Production with a Quantum Efficiency of Almost Unity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(8): 5161-5169.
- [94] CUI S, SI Y, FU X-Z, et al. Intracellularly-photosensitized bio-hybrid with biogenic quantum dots for enhanced wastewater denitrification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457: 141237.
- [95] ZHONG C, REN Y, GUO Y, et al. Photoelectron-promoted sulfate reduction for heavy metal removal without organic carbon addition[J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2024, 58(49): 21680.
- [96] YANG G, WEI L, LV Y, et al. Photo-assisted enhancement of uranium mine wastewater purification by a self-assembled *Shewanella putrefaciens*-CdS biohybrid system[J]. *ACS Materials Letters*, 2024, 6(10): 4606.
- [97] CAI J, LI H. Electrospun polymer nanofibers coated with TiO₂ hollow spheres catalyze for high synergistic photo-conversion of Cr (VI) and As (III) using visible light[J]. *Chem. Eng. J.*, 2020, 398: 125644.
- [98] DU Y, GUO J, HOU Y, et al. A light-switch for efficient decolorization of azo dye wastewater based on bacteria-semiconductor interaction[J]. *Environmental Science Nano*, 2022, 9(5): 1819.
- [99] SHI H, JIANG X, WEN X, et al. Enhanced azo dye reduction at semiconductor-microbe interface: the key role of semiconductor band structure[J]. *Water Research*, 2024, 248: 120846.
- [100] HUANG S, TANG J, LIU X, et al. Fast light-driven biodecolorization by a *Geobacter sulfurreducens*-CdS biohybrid[J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2019, 7(18): 15427.
- [101] WANG Y, JIN M, WANG J, et al. Light-driven biodegradation of azo dyes by *Shewanella decolorationis*-CdS biohybrid in wastewater lacking electron donors[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2023, 107: 447.
- [102] WANG H, LE Y, SUN J. Light-driven bio-decolorization of triphenylmethane dyes by a *Clostridium thermocellum*-CdS biohybrid[J]. *Journal of Hazardous materials*, 2022, 431: 128596.
- [103] CHOI Y, LEE S Y. Biosynthesis of inorganic nanomaterials using microbial cells and bacteriophages[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2020, 4: 638.
- [104] LIU G, GAO F, ZHANG H, et al. Biosynthetic CdS-*Thiobacillus thio-parus* hybrid for solar-driven carbon dioxide fixation[J]. *Nano Research*, 2023, 16(4): 4531.
- [105] ZHANG K, MIN X, ZHANG T, et al. Biodeposited nano-CdS drives the in situ growth of highly dispersed sulfide nanoparticles during pyrolysis for enhanced oxygen evolution reaction[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(49): 54553.
- [106] PI S, YANG W, FENG W, et al. Solar-driven waste-to-chemical conversion by wastewater-derived semiconductor biohybrids[J]. *Nat. Sustain.*, 2023, 6(12): 1673.
- [107] ZUO W, YU Y, HUANG H. Making waves: microbe-photocatalyst hybrids may provide new opportunities for treating heavy metal polluted wastewater[J]. *Water Research*, 2021, 195: 116984.
- [108] QIN Z, ZHAO Z, JIAO W, et al. Phenanthrene removal and response of bacterial community in the combined system of photocatalysis and PAH-degrading microbial consortium in laboratory system[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 301: 122736.
- [109] ZUO W, ZHANG L, ZHANG Z, et al. Degradation of organic pollutants by intimately coupling photocatalytic materials with microbes: a review[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, 41(2): 273.
- [110] VAN DER ZEE F P, CERVANTES F J. Impact and application of electron shuttles on the redox (bio) transformation of contaminants: a review[J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27 (3): 256.
- [111] SUN P, LI K, LIN K, et al. Ag₂S quantum dots for use in whole-cell biohybrid catalyst for visible-light-driven photocatalytic organic pollutant degradation[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(7): 9754.
- [112] WANG Y, ZHAO H, LIU H, et al. CdS nanoparticles-decorated *Shewanella oneidensis* cells for ultrafast photoreduction and detoxification of nitrobenzene[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(12): 14069.
- [113] WANG Y, DAI H, JIN M, et al. Light-driven biodegradation of chloramphenicol by photosensitized *Shewanella oneidensis*

- MR-1[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 413: 131508.
- [114] YAN T, CHEN X, KUMARI L, et al. Multiscale CO₂ electrocatalysis to C₂⁺ products: reaction mechanisms, catalyst design, and device fabrication[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(17): 10530.
- [115] YE J, YU J, ZHANG Y, et al. Light-driven carbon dioxide reduction to methane by *Methanosarcina barkeri*-CdS biohybrid[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 257: 117916.
- [116] YE J, WANG C, GAO C, et al. Solar-driven methanogenesis with ultrahigh selectivity by turning down H₂ production at biotic-abiotic interface[J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 6612.
- [117] GU W, HU J, LI L, et al. Liquid Metal Nanobiohybrids for High-Performance Solar-Driven Methanogenesis via Multi-Interface Engineering[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, 64(15): e202423336.
- [118] YE J, WANG C, GAO C, et al. Solar-driven methanogenesis with ultrahigh selectivity by turning down H₂ production at biotic-abiotic interface[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 6612.
- [119] WANG Q, KALATHIL S, PORNRUNGROJ C, et al. Bacteria-photocatalyst sheet for sustainable carbon dioxide utilization[J]. *Nature Catalysis*, 2022, 5(7): 633.
- [120] HE Y, WANG S, HAN X, et al. Photosynthesis of acetate by *Sporomusa ovata*-CdS biohybrid system[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(20): 23364.
- [121] GAI P, YU W, ZHAO H, et al. Solar-powered organic semiconductor-bacteria biohybrids for CO₂ reduction into acetic acid[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(18): 7224.
- [122] SAKIMOTO K K, ZHANG S J, YANG P. Cysteine-cystine photoregeneration for oxygenic photosynthesis of acetic acid from CO₂ by a tandem inorganic-biological hybrid system[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(9): 5883.
- [123] HU G, LI Z, MA D, et al. Light-driven CO₂ sequestration in *Escherichia coli* to achieve theoretical yield of chemicals[J]. *Nature Catalysis*, 2021, 4(5): 395.
- [124] LI Y, LI S, QU K, et al. Integration of sulfur nanoparticles as dual electron donors in a photosensitizer-microbe hybrid for photocatalytic CO₂-to-polyhydroxybutyrate conversion[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025:
- [125] KIEFER D, MERKEL M, LILGE L, et al. From acetate to bio-based products: underexploited potential for industrial biotechnology[J]. *Trends in Biotechnology*, 2021, 39(4): 397.
- [126] GONG G, WU B, LIU L, et al. Metabolic engineering using acetate as a promising building block for the production of bio-based chemicals[J]. *Engineering Microbiology*, 2022, 2(4): 100036.
- [127] CHOI Y, PARK T J, LEE D C, et al. Recombinant *Escherichia coli* as a biofactory for various single-and multi-element nanomaterials[J]. *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(23): 5944.
- [128] HELBIG K, GROSSE C, NIES D H. Cadmium toxicity in glutathione mutants of *Escherichia coli*[J]. *Journal of Bacteriology*, 2008, 190(15): 5439.
- [129] BASSETT S, DING Y, ROY M K, et al. Light-driven metabolic pathways in non-photosynthetic biohybrid bacteria[J]. *Chembiochem*, 2024, 25(2): e202300572.
- [130] SHI Y, ZHANG K, CHEN J, et al. Long-term autotrophic growth and solar-to-chemical conversion in *Shewanella Oneidensis* MR-1 through light-driven electron transfer[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2024, 63(51): e202412072.
- [131] GAN Y, CHAI T, ZHANG J, et al. Light-driven CO₂ utilization for chemical production in bacterium biohybrids[J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2024, 60: 294.
- [132] TIAN Y, GUO Z, HE J, et al. Light-driven eosin Y-*Ralstonia eutropha* biohybrid for CO₂ conversion to acetoin via specific photo-induced electron transfer and metabolic engineering[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2025, 93: 103051.
- [133] LIANG J, CHEN Z, YIN P, et al. Efficient semi-artificial photosynthesis of ethylene by a self-assembled InP-Cyanobacterial biohybrid system[J]. *ChemSusChem*, 2023, 16(20): e202300773.
- [134] XU M, TREMBLAY P, DING R, et al. Photo-augmented PHB production from CO₂ or fructose by *Cupriavidus necator* and shape-optimized CdS nanorods[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 142050.
- [135] XU M, TREMBLAY P, JIANG L, et al. Stimulating Bioplastic production with light energy by coupling *Ralstonia eutropha* with the photocatalyst graphitic carbon nitride[J]. *Green Chemistry*, 2019, 21(9): 2392.
- [136] LV S, DU Y, WU F, et al. Review on LSPR assisted photocatalysis: effects of physical fields and opportunities in multifield decoupling[J]. *Nanoscale Advances*, 2022, 4(12): 2608.
- [137] WANG B, HUANG X, LIU Z, et al. Solar interfacial evaporation systems with multi-field synergies boost water purification and blue energy harvesting technologies[J]. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(20): 7600.
- [138] WANG S, SI Y, LU K, et al. Energy and mass flow in photocatalytic water splitting by coupling photothermal effect[J]. *Chemical Physics Reviews*, 2024, 5(3): 031301.
- [139] WU S, XU L, XIAO L. Performance study of a novel multifunctional Trombe wall with air purification, photovoltaic, heating and ventilation[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 203: 112229.
- [140] LIU W, DU M, WANG Y, et al. Pyroelectric photocatalysis: polarization mechanism insight, in situ characterizations and challenges[J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 485: 149627.
- [141] SONG H, SUN K, HUANG H, et al. Integrating photochemical and photothermal effects for selective oxidative coupling of methane into C₂⁺ hydrocarbons with multiple

- active sites[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 2831.
- [142] YE J, WANG S, YANG C, et al. Biohybrid-based pyroelectric bio-denitrification driven by temperature fluctuations[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 5877.
- [143] CHEN L, AN X, ZHAO S, et al. Multienergy codriven electron transfer across the nano-bio interface for efficient photobiocatalysis[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(11): 11164.
- [144] SEZER N, KOÇ M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting[J]. *Nano Energy*, 2021, 80: 105567.
- [145] HU Q, REN G, YE J, et al. Hygroelectric-photovoltaic coupling generator using self-assembled bio-nano hybrids[J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 452: 139169.
- [146] REN G, WANG Z, ZHANG B, et al. A facile and sustainable hygroelectric generator using whole-cell *Geobacter sulfurreducens*[J]. *Nano Energy*, 2021, 89: 106361.
- [147] XUE G, XU Y, DING T, et al. Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials[J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(4): 317.
- [148] KOLLER A P, WOLF L, BRÜCK T, et al. Studies on the scale-up of biomass production with *Scenedesmus* spp. in flat-plate gas-lift photobioreactors[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2018, 41(2): 213-220.
- [149] FU H, ZHAO Z, YAO G, et al. Light-Driven Microbe — Nanomaterial Hybrids for CO₂ Conversion: Innovations in Synthesis, Materials, Microbial Engineering, and Reactor Design[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2026, 9(11): 7242-7266.
- [150] LI S, TSUKAGOSHI K, ORGIU E, et al. Charge transport and mobility engineering in two-dimensional transition metal chalcogenide semiconductors[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(1): 118.
- [151] LAU V W H, MOUDRAKOVSKI I, BOTARI T, et al. Rational design of carbon nitride photocatalysts by identification of cyanamide defects as catalytically relevant sites[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12165.
- [152] HOU T, LIANG J, WANG L, et al. Cd_{1-x}Zn_xS biomaterialized by engineered bacterium for efficient photocatalytic hydrogen production[J]. *Materials Today Energy*, 2021, 22: 100869.
- [153] KANG S, DU M, LIU N, et al. Chain assembly of *Rhodococcus* bacteria with O-doped g-C₃N₄ for photocatalysis mediated high-performance partial nitrification: from nitrite resource evolution to device application[J]. *Journal of Hazardous materials*, 2025, 488: 137421.
- [154] SIVAGURUNATHAN P, SAHOO P C, KUMAR M, et al. Synergistic role of carbon quantum dots on biohydrogen production[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6): 114188.
- [155] TRIPATHY S R, BARAL S S. Defect engineering in semiconductor photocatalysts: enhancing photocatalytic activity for green energy production[J]. *Adv. Energy Sustain. Res.*, 2025:
- [156] LV X, HUANG W, GAO Y, et al. Boosting solar hydrogen production via electrostatic interaction mediated E. coli-TiO₂-x biohybrid system[J]. *Nano Research*, 2024, 17(6): 5390.
- [157] TSAO C, FANG M, HSU Y. Modulation of interfacial charge dynamics of semiconductor heterostructures for advanced photocatalytic applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 438: 213876.
- [158] WEN N, JIANG Q, CUI J, et al. Intracellular InP quantum dots facilitate the conversion of carbon dioxide to value-added chemicals in non-photosynthetic bacteria[J]. *Nano Today*, 2022, 47: 101681.
- [159] SU L, FUKUSHIMA T, PRIOR A, et al. Modifying cytochrome c maturation can increase the bioelectronic performance of engineered *Escherichia coli*[J]. *ACS Synthetic Biology*, 2020, 9(1): 115.
- [160] LIN S, TAO Z, LI Z, et al. Enhancing photocatalytic hydrogen production from engineered *Escherichia coli*-biohybrid system via intracellular electron redirection[J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 499: 156488.
- [161] WANG B, ZENG C, CHU K H, et al. Enhanced biological hydrogen production from *Escherichia coli* with surface precipitated cadmium sulfide nanoparticles[J]. *Advanced Energy Materials*, 2017, 7(20): 1700611.
- [162] LIANG G, XU X, CHEN X, et al. Designing a periplasmic photosynthetic biohybrid system for succinate and electric energy production[J]. *Chem. Eng. J.*, 2023, 477: 147152.
- [163] ROBERTSON I L B, ZHANG H, REISNER E, et al. Engineering of bespoke photosensitizer-microbe interfaces for enhanced semi-artificial photosynthesis[J]. *Chemical Science*, 2024, 15(26): 9893.
- [164] LI H, YU X, WU Y, et al. Membraneless organelles assembled by AuNPs-enzyme integration in non-photosynthetic bacteria: achieving high specificity and selectivity for solar hydrogen production[J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 492: 152207.
- [165] TAO Z, LIN S, LI S, et al. Genetically engineered hybrid biosystem for highly efficient conversion from glucose to hydrogen[J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2025, 13(17): 6164.
- [166] MA J, YAN Z, SUN X, et al. A hybrid photocatalytic system enables direct glucose utilization for methanogenesis[J]. *Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(4): e2317058121.
- [167] WANG X, ZHANG J, LI K, et al. Photocatalyst-mineralized biofilms as living bio-abiotic interfaces for single enzyme to whole-cell photocatalytic applications[J]. *Science Advances*, 2022, 8(18): eabm7665.
- [168] MA L, FANG Z, WANG Y, et al. Photo-driven highly efficient one-step CO₂ biomethanation with engineered photo-synthetic bacteria *Rhodospseudomonas palustris*[J]. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2020, 8(26): 9616.
- [169] CESTELLOS-BLANCO S, CHAN R R, SHEN Y, et al.

- Photosynthetic biohybrid coculture for tandem and tunable CO₂ and N₂ fixation[J]. Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(26): e2122364119.
- [170] YU W, BAI H, ZENG Y, et al. Solar-driven producing of value-added chemicals with organic semiconductor-bacteria biohybrid system[J]. Research, 2022, 2022: 9834093.
- [171] MOON H, LEE C, LEE W, et al. Stability of quantum dots, quantum dot films, and quantum dot light-emitting diodes for display applications[J]. Advanced Materials, 2019, 31(34): 1804294.
- [172] GRIGGS S, MARKS A, BRISTOW H, et al. n-Type organic semiconducting polymers: stability limitations, design considerations and applications[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(26): 8099.
- [173] WENG B, QI M Y, HAN C, et al. Photocorrosion inhibition of semiconductor-based photocatalysts: basic principle, current development, and future perspective[J]. ACS Catalysis, 2019, 9(5): 4642.
- [174] CHEN S, HUANG D, XU P, et al. Semiconductor-based photocatalysts for photocatalytic and photoelectrochemical water splitting: will we stop with photocorrosion? [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(5): 2286.
- [175] HOULE F A, YANO J, AGER J W. Hurry up and wait: managing the inherent mismatches in time scales in natural and artificial photosynthetic systems[J]. ACS Catalysis, 2023, 13(11): 7139.
- [176] DING Y, LIANG L, HAN N, et al. The "photons storage pool" effect of long afterglow phosphor for round-the-clock photocatalytic clean energy evolution[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(3): 113111.
- [177] HOEHLER T M, JØRGENSEN B B. Microbial life under extreme energy limitation[J]. Nature Reviews Microbiology, 2013, 11(2): 83.
- [178] LEWIS W H, TAHON G, GEESINK P, et al. Innovations to culturing the uncultured microbial majority[J]. Nature Reviews Microbiology, 2021, 19(4): 225.
- [179] WANG B, SHI L, LU A. Photosynthesis by nonphotosynthetic microorganisms via semiconductor photocatalysis[J]. mLife, 2024, 3(4): 532.
- [180] SUN C, HU K, MU D, et al. The widespread use of nanomaterials: the effects on the function and diversity of environmental microbial communities[J]. Microorganisms, 2022, 10(10): 2080.
- [181] YANG S, HU A, ZHANG J, et al. Light-driven biohybrid for phosphorus recovery via struvite biomineralization in tetracycline-laden livestock wastewater[J]. Water research, 2025: 123745.
- [182] CHEN S, CHEN J, ZHANG L, et al. Biophotoelectrochemical process co-driven by dead microalgae and live bacteria[J]. The ISME Journal, 2023, 17(5): 712-719.
- [183] JIANG P, DAI Y, HOU Y, et al. Artificial intelligence-assisted design, synthesis and analysis of smart biomaterials[J]. BMEMat, 2025, 2: e70004.
- [184] KONG D, QIAN J, GAO C, et al. Machine learning empowering microbial cell factory: a comprehensive review[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2025, 197: 4897.
- [185] TZACHOR A, SABRI S, RICHARDS C E, et al. Potential and limitations of digital twins to achieve the Sustainable Development Goals[J]. Nature Sustainability, 2022, 5(10): 822-829.



通讯作者: 陈曼(1987—),女,教授,博士,博士生导师。研究方向为土水界面光活性材料-微生物耦合驱动的氮转化过程等。

E-mail: chenman@fafu.edu.cn



第一作者: 刘宇晖(1994—),男,副教授,博士,硕士生导师。研究方向为土壤矿物光电化学驱动的碳循环、土壤环境同位素地球化学。

E-mail: liuyuhui@fafu.edu.cn