

特约评述

DOI: 10.12211/2096-8280.2026-053

光催化-生物杂合系统强化污染物降解的研究进展：从功能组装到理性设计

姚智凯^{1, 2, 3}, 陈乐天^{1, 4}, 谭小萍⁵, 李吉宏⁵, 贾伟彬^{2, 3}, 许玫英^{2, 3}

(¹ 华南农业大学, 生命科学学院, 广东 广州 510642; ² 广东省科学院微生物研究所, 华南应用微生物国家重点实验室, 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广东 广州 510070; ³ 广东省环境保护微生物与区域生态安全重点实验室, 广东 广州 510070; ⁴ 华南农业大学, 农学院, 广东 广州 510642; ⁵ 广州市净水有限公司, 广东省污水处理及污泥资源化工程技术研究中心, 广东 广州 510655)

摘要：环境中难降解污染物的持续累积对生态安全和人类健康构成了严重威胁。光催化-生物杂合系统(Photocatalysis-Biohybrid Systems, PBS)通过将光催化材料与非光敏微生物耦合, 能够在太阳能驱动下实现污染物的高效降解与转化。然而, 当前面向污染物降解的PBS多停留在“材料+天然单菌”的经验组装阶段, 面临跨界电子传递受限、胞内还原力非定向分流及降解代谢路径不完整等核心瓶颈, 严重制约了其性能提升与工程应用。本文系统概述了PBS的协同作用机制、结构特征及其关键影响因素, 总结了其在抗生素、多环芳烃、金属离子及微塑料等典型污染物降解中的最新应用进展, 同时重点围绕合成微生物组构建、电子传递链重构以及材料界面优化等核心策略, 深入分析了强化杂合系统的有效途径。最后, 本文探讨了PBS当前面临的跨界面电子传递效率低、降解路径不完整及系统稳定性不足等核心挑战, 并展望了通过合成微生物组构建、电子传递链定向调控以及群落-材料界面的协同适配等策略实现理性设计与工程化应用的未来前景。本文旨在推动PBS从经验驱动的“简单功能组装”向可预测、可调控的“理性系统设计”转变, 为构建高效、稳定、可控的污染物降解系统提供理论依据与技术参考。

关键词：非光敏微生物; 光催化-生物杂合系统; 污染物降解; 合成生物学; 电子传递

中图分类号：Q819; X172 **文献标志码：**A

收稿日期: XXXX-XX-XX 修回日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0910300), 国家自然科学基金(U24A20637, 32300095), 广东省基础与应用基础研究基金省市联合基金项目(粤港澳研究团队项目, No. 2025B515130001), 广东特支计划杰出人才项目(2023JC07L096), 广东省乡村振兴战略专项资金种业振兴行动项目(2024-WPY-00-013), 广州市国资委科技创新创业项目“面向减污降碳的绿色低碳污水处理关键技术集成研究与工程应用”

引用本文: 姚智凯, 陈乐天, 谭小萍, 李吉宏, 贾伟彬, 许玫英. 光催化-生物杂合系统强化污染物降解的研究进展: 从功能组装到理性设计[J]. 合成生物学, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-053

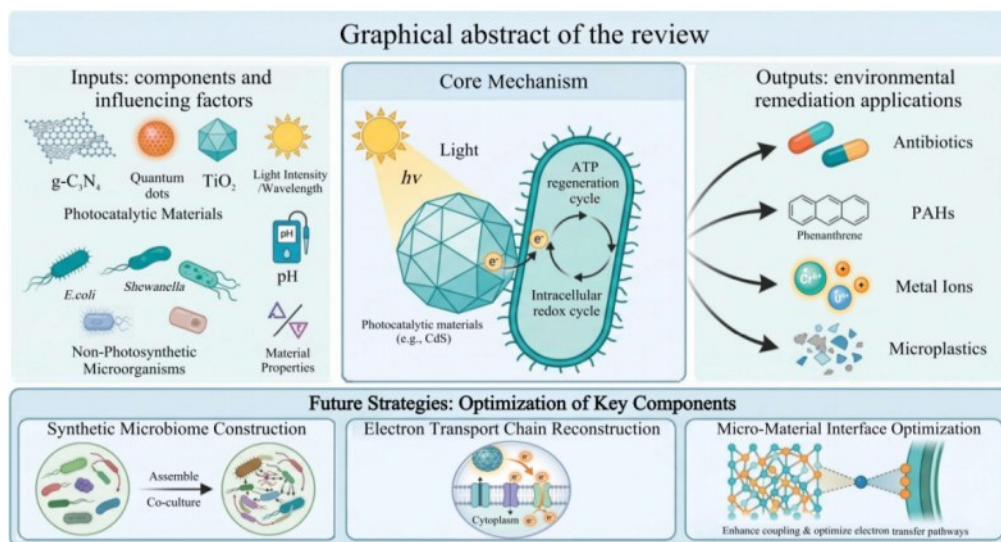
Citation: YAO Zhikai, CHEN Letian, TAN Xiaoping, LI Jihong, JIA Weibin, XU Meiyang. Advances in Enhanced Pollutant Degradation by Photocatalysis-Biohybrid Systems: From Functional Assembly to Rational Design[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-053

Advances in Enhanced Pollutant Degradation by Photocatalysis-Biohybrid Systems: From Functional Assembly to Rational Design

YAO Zhikai^{1, 2, 3}, CHEN Letian^{1, 4}, TAN Xiaoping⁵, LI Jihong⁵, JIA Weibin^{2, 3}, XU Meiyang^{2, 3}

⁽¹⁾College of Life Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; ⁽²⁾Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, State Key Laboratory of Applied Microbiology Southern China, Institute of Microbiology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, Guangdong, China; ⁽³⁾Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Protection Microbiology and Regional Ecological Security, Guangzhou 510070, Guangdong, China; ⁽⁴⁾College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; ⁽⁵⁾Guangzhou Water Purification Co., Ltd., Guangdong Engineering & Technology Research Center for Wastewater Treatment and Sludge Resource Utilization, Guangzhou 510655, Guangdong, China)

Abstract: The continuous and pervasive accumulation of recalcitrant pollutants in the natural environment poses a progressively severe threat to global ecological security and human health. Conventional remediation technologies often struggle to completely mineralize these complex compounds. To address this critical issue, Photocatalysis-Biohybrid Systems (PBS) have emerged as a promising, sustainable strategy. These systems enable the efficient degradation and structural transformation of persistent pollutants driven directly by solar energy by seamlessly coupling semiconductor photocatalytic materials with non-photosynthetic microorganisms. By bridging abiotic light-harvesting components with whole-cell biocatalysts, PBS cleverly harness the strengths of both fields. However, current PBS configurations for environmental pollutant degradation largely remain at the rudimentary, empirical assembly stage, heavily relying on the "material + natural single strain" paradigm. Consequently, they face several core bottlenecks, such as restricted cross-interface electron transfer efficiency between inorganic materials and biological membranes, the non-directional diversion of intracellular reducing power, and incomplete microbial degradation metabolic pathways. These intrinsic limitations severely restrict their overall performance enhancement, operational stability, and subsequent large-scale engineering applications. To overcome these barriers, this comprehensive review systematically outlines the fundamental synergistic mechanisms, structural design characteristics, and key environmental influencing factors of various PBS architectures. It critically summarizes recent application advances in the targeted degradation of typical environmental pollutants, including antibiotics, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), heavy metal ions, and emerging microplastics. Furthermore, the review provides an in-depth, mechanistic analysis of effective pathways for systematic enhancement. Particular focus is directed toward core optimization strategies, such as synthetic microbiome construction for multi-step degradation, targeted electron transport chain reconstruction to boost energy utilization, and material interface optimization to enhance biocompatibility and electron



transfer rates. Finally, this paper discusses the core challenges currently facing PBS, including low cross-interface electron transfer efficiency, incomplete degradation pathways, and insufficient system stability. It further highlights future prospects for achieving rational design and engineering applications through advanced strategies, such as the construction of synthetic microbiomes, the targeted regulation of electron transport chains, and the synergistic adaptation of community-material interfaces. Ultimately, this review aims to drive the fundamental transition of PBS research from an experience-driven "simple functional assembly" to a predictable, robust, and controllable "rational system design". By doing so, it provides a crucial theoretical basis and technical reference for the future development of highly efficient, stable, and scientifically controllable pollutant degradation systems globally.

Keywords: non-photosynthetic microorganisms; photocatalysis-biohybrid systems; pollutant degradation; synthetic biology; electron transfer

随着工业化和城市化的快速发展，大量难降解污染物（如抗生素、微塑料等）持续进入环境，对生态安全和人体健康构成严重威胁^[1-3]。如何实现这些污染物的高效、绿色、低成本治理，已成为环境科学与工程领域的核心挑战之一。微生物因其代谢多样性与环境适应性，在污染物降解中发挥着重要作用^[4-6]。然而，传统微生物降解过程通常依赖外源还原力（如氢气、甲酸或其它有机物），导致能耗较高且在复杂环境中效率受限^[7]。近几十年来，光催化-生物杂合系统（Photocatalysis-Biohybrid Systems, PBS）作为一种新兴的跨学科技术逐渐引起学术界的广泛关注。

它利用光催化材料作为“人工光合单元”，再与微生物的催化能力相结合，为太阳能的转化与利用开辟了新途径。特别是利用具有独特催化潜力但不具备光合作用的非光敏微生物所构建的PBS，它很好地融合了光催化材料的捕光特性与非光敏微生物的催化能力等优势，使得原本无法捕获太阳光的非光敏微生物的功能活性得到显著拓展^[8, 9]。在该系统中，光催化材料在光驱动下产生光激发电子或高能还原物质，为非光敏微生物持续提供能量与还原力，使得非光敏微生物也能够间接利用太阳光，最终在太阳能驱动下实现污染物的高效降解与绿色转化。

表1 单一光催化、单一生物处理与PBS的特性对比
Table 1 Characteristics Comparison of Standalone Photocatalysis, Standalone Biological Treatment, and PBS

技术类型	能量来源/驱动力	催化核心	还原力/电子来源	矿化程度	降解定向性与有毒中间产物风险	关键限制因素	持续降解能力
单一光催化技术	光能（可见光/紫外光）	光催化材料	光生电子	高，但路径不可控，中间产物复杂	定向性差（非选择性氧化），易生成毒性中间产物，风险高	光生电子与空穴极易复合，导致光能利用率低	常需添加牺牲剂/氧化剂，该物质在持续降解过程中不断被消耗，导致降解难以维持
单一生物处理技术	化学能（有机碳源、电子供体）	纯菌/混菌	需持续添加外源电子供体	取决于污染物种类，难降解物质则易积累，无法实现完全矿化	定向性强，但难降解物代谢路径受限，易积累，难以进一步转化毒性中间产物	电子供体成本高、速率慢	碳源与电子供体是其持续降解赖以维持的前提，停止补给则反应终止
PBS	光能直接驱动，替代外源化学还原力	光催化材料-微生物复合界面	光生电子经跨界传递直接供给微生物	氧化还原能力得到增强，可通过生物代谢定向转化有毒中间产物，矿化程度较高	定向性强，毒性中间产物能被有序代谢，风险低	界面电子传递阻力与材料稳定性	利用可再生光能驱动，有效替代外源化学试剂，绿色低碳，可持续降解污染物

PBS的核心优势在于突破了非光敏微生物在能量获取上的天然局限。传统非光敏微生物（如希瓦氏菌、大肠杆菌和产甲烷古菌等）虽具备多样化的代谢途径，但无法直接捕获光能^[10, 11]。在PBS中，大多数光催化材料的导带底电位较生物氧化还原组分（如细胞色素c）更负，被可见光照射后，其产生的光激发电子可在热力学驱动下转移至微生物，参与还原性辅酶的再生，为其提供额外的能量与还原力，从而支持微生物的生长与代谢活动^[12, 13]。通过这种方式，PBS可赋予非光敏微生物间接利用太阳光的能力，使其与光催化材料协同耦合，互相发挥出自身的优势，并让整个系统的催化能力得到进一步提高。这种特殊的“半人工光合作用”^[14]，即是PBS的核心所在。已有大量研究表明，基于上述非光敏微生物的PBS能在可见光下高效还原转化多种难降解有毒污染物，展现出该杂合系统相较于单一光催化或单一生物处理的显著优势和巨大潜力^[15-17]（表1）。

尽管PBS的前景非常广阔，但目前该领域在发展过程中仍存在一些瓶颈，例如光激发电子向胞内的定向传递效率仍然偏低^[18, 19]、光催化材料在杂合系统中的长期稳定性与生物相容性有待提高^[20]以及污染物降解路径与电子流调控机制尚不明晰等^[19]。究其根本，这些瓶颈很大程度上源于目前多数PBS仍停留在“材料+天然单菌”的经验性组装阶段，缺乏系统性的设计与优化。由于单一天然菌株的代谢能力存在天然上限，传统单菌PBS在应对环境污染物时常暴露出诸多局限性：一是电子利用效率低，跨界传递的光生电子易被胞内非目标代谢网络分流；二是代谢路径不完整，在降解复杂污染物时容易导致有毒中间产物的积累；三是面对实际环境中多组分的复合型污染，单菌体系下的PBS处理能力和环境适应性往往十分有限。随着合成生物学和材料科学等交叉学科的发展，特别是合成微生物组理念的引入，为PBS的理性构建提供了全新范式。通过群落分工设计、底盘细胞设计、电子传递链重构、异源降解通路导入及动态调控等策略，相关研究人员正逐步克服单菌体系的局限，并实现对PBS中微生物功能的“按需定制”，推动PBS从经验驱动的“功能组装”向可预测、可调控的“理性设计”转变。本

文系统综述了基于非光敏微生物的PBS在污染物降解中的研究进展，在此过程中，我们不仅总结了针对污染物降解的相关案例，还广泛借鉴了绿色生物制造（如产氢、固碳等）领域的先进底层机制，随后结合合成微生物组构建、电子传递链重构及材料界面优化等核心策略，深入分析PBS系统强化的有效途径，并展望了其在理性系统设计中的发展前景。同时，本文旨在为构建高效、稳定、可控的污染物降解合成生物体系提供理论参考。

此外，近年来已有大量关于光催化-生物杂合系统或半人工光合作用的综述发表，但这些工作大多聚焦于绿色能源转化和高价值化学品的生产，鲜有专门针对环境污染物定向降解与去除的系统性总结。同时现有综述多侧重于材料改性、单菌体系的构建或机制方面的研究，缺乏从“系统优化设计”和“群落代谢调控”等层面的探讨。如表2所示，本文在梳理已有研究的基础上，进一步凸显了从功能组装迈向理性设计的独特视角，为该领域的研究拓展思路。

1 强化污染物降解的PBS：作用机制、结构特征与影响因素

构建PBS的核心目标之一，是实现对难降解污染物的高效去除。为达成这一目标，必须深入理解PBS的协同降解机制、电子传递的作用以及制约降解效能的关键因素。本章以基于非光敏微生物的PBS作为主要对象，首先剖析跨界界面电子传递与胞内代谢响应的协同降解机制，继而归纳半导体纳米材料-生物杂合系统、光电极-生物杂合系统等典型结构模式，最后从环境条件、电子介体及系统结构设计等角度，分析杂合系统降解污染物过程中的关键影响因素，为后续基于合成生物学和材料科学等学科驱动下的理性优化奠定基础。

1.1 强化污染物降解的协同作用机制

光催化-生物杂合系统主要可分为三个阶段，分别是光捕获阶段、电子转移阶段和能量转移阶

表2 近年来光催化-生物杂合系统及相关领域综述的比较分析

Table 2 Comparative Analysis of Recent Reviews on PBS and Related Fields

作者与年份	核心主题	主要侧重领域	文献探讨重点
宋浩等人 ^[21] (2026)	无机纳米材料-微生物杂合系统中的电子传递机制及微生物固碳途径的工程化改造	工业化碳捕集与转化、高值化学品合成(如利用光生电子驱动CO ₂ 转化为乙酸、塑料等)	专门聚焦于温室气体的生物固定与碳资源化利用,未提及复杂环境污染物的强化降解与毒性削减
王凯冲等人 ^[22] (2025)	光驱动全细胞杂合体的构建机制及半导体与微生物界面的电子交互机制	太阳能转化(如CO ₂ 高价值转化、固氮、制氢)及常规污染物的去除与资源化	重点探讨杂合系统的绿色合成转化,仅将污染物降解作为系统的应用分支之一,尚未涉及针对复杂污染物的理性系统设计与优化方法
邹雨泰等人 ^[23] (2024)	聚合物-微生物杂合体的构建及其在光电传递与细胞稳定性方面的强化机制	绿色生物合成与能源转化(如固定CO ₂ 生产乙酸/甲烷等)	侧重于聚合物材料与微生物的PBS构建、界面修饰与单细胞防护,以及围绕利用杂合系统生产高价值化学品展开探讨,未涉及难降解污染物的降解和转化
Liang 等人 ^[24] (2024)	杂合系统中的太阳能传递转化机制(能量捕获、跨膜运输及化学转化)	太阳能到化学能的具体转化过程(如利用光生电子驱动CO ₂ 还原、产氢等)	聚焦于PBS机制方面的研究,即解析其底层能量传递机制,并未提及对难降解污染物的降解转化及毒性去除的相关内容
Yu 等人 ^[9] (2024)	杂合系统中光生空穴的消除策略(如利用牺牲剂或废弃物作为电子供体等)	维持杂合系统稳定运行,及时消除运行过程中产生的光生空穴	侧重于杂合系统的优化,即如何通过消除空穴来保护系统不被破坏,缺少对杂合系统机制与应用的相关探讨
本文(2026)	基于非光敏微生物的PBS强化污染物降解及理性设计策略	抗生素、多环芳烃、金属离子及微塑料等典型难降解污染物的还原转化、彻底降解与优化策略	聚焦于污染物治理领域,根据非光敏微生物PBS的机制、结构特征与影响因素提出相关的优化策略,并系统总结了从经验驱动的“功能组装”迈向合成微生物组与电子传递链重构等“理性设计”的演进路径

段^[25]。当半导体等光催化材料在光照射下,并且其吸收能量 $h\nu$ 大于或等于带隙(E_g)的时候,光催化材料就会被激活,导致光激发电子的产生^[15, 16]。随后,这些光激发电子可通过直接转移途径(由细胞色素或酶介导的电子转移)或间接转移途径(由氧化还原介体介导的电子转移或由氢气、甲酸等介导的电子转移),转移至微生物的活性位点^[7, 17]。在这里,它们可以参与微生物还原性辅酶(如NADH、NADPH)的再生,为细胞注入了额外的还原力,并使其氧化还原能力得到增强。这一还原力的增强,正是PBS能够高效还原转化Cr⁶⁺、偶氮染料等难降解污染物的核心动力来源^[26, 27]。同时,微生物利用额外的NADH等在细胞内部合成生命活动所需的物质,而NADH等会失去电子,这些电子通过电子传递链所释放的能量,可将质子(H⁺)跨膜泵出,构成质子梯度,从而加速ATP的合成。最终,这一系列过程为微生物的合成代谢提供了持续的能量供应^[18, 28]。在整个过程中,光催化材料负责光激发电子的产生与传递,还能对微生物起到保护和固定作用。而微生物则利用光催化材料产生的光激发电子,增强了自身的氧化还原反应和ATP的合成能力,这

样就能大大提高自身合成某种化学产品的能力,或者对于某种物质的降解能力。简单概括而言,光催化材料充当光吸收剂的作用,产生光激发电子,然后大肠杆菌、希瓦氏菌等非光敏微生物就可以利用这些电子参与到自身的代谢途径中,以靶向合成复杂产物,或实现对特定有机污染物的彻底降解与矿化^[19](图1)。

1.2 PBS的结构特征与构建模式

为强化对难降解有毒污染物的光驱动去除,PBS的结构设计至关重要。光催化材料的类型、电子传递路径、界面结合方式以及材料的空间分布等,直接决定了光激发电子向微生物胞内的注入效率,进而影响污染物的还原转化速率。根据光催化材料类型及电子传递模式的不同,当前基于非光敏微生物的PBS主要可分为半导体纳米材料-生物杂合系统和光电极-生物杂合系统两大类。

1.2.1 半导体纳米材料-生物杂合系统

近几十年来,研究人员对具有光捕获和催化能力的半导体材料进行了持续探索^[29, 30]。这类材料能够吸收太阳光并将其转化为其他形式的能

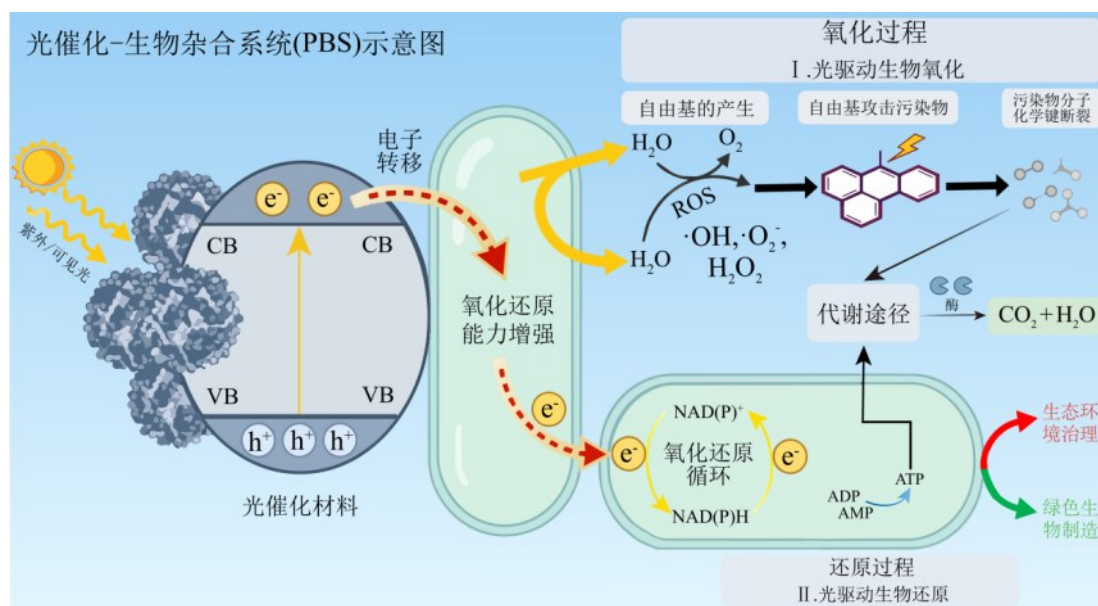


图1 光催化-生物杂合系统 (PBS) 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Photocatalysis-Biohybrid System(PBS)

量^[31, 32], 但由于缺乏生物酶而难以实现高选择性催化, 致使其在复杂污染物降解及高价值多碳产物合成中的应用受到限制^[33]。半导体纳米材料-生物杂合系统由此应运而生, 其利用半导体纳米材料进行光捕获, 以微生物全细胞或其所含酶系作为催化中心, 将光催化氧化与生物代谢深度耦合, 从而实现对难降解污染物的高效转化^[17]。

在半导体材料的选择上, 其带隙需匹配非光敏微生物的电子需求, 同时还需满足生物相容性等要求^[34]。较常用的半导体材料包括TiO₂ (二氧化钛) 和CdS (硫化镉) 等。TiO₂具有强氧化能力、优异的化学稳定性、低成本及无毒性等优点而被广泛使用^[35, 36], 但其带隙较宽 (如锐钛矿为3.2 eV), 光响应范围局限于紫外区, 大部分可见光无法被有效利用^[37]。Lv等人通过静电相互作用将氧缺陷型TiO₂ (TiO₂-x) 与大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 结合, 设计了一种可在太阳光下高效产氢的*E. coli*-TiO₂-x杂合系统。在该体系中, TiO₂-x产生的光生电子被传递至大肠杆菌胞内并参与产氢途径, 缩短的电子转移路径促进了光激发电子注入效率^[38]。CdS因其较窄的带隙和良好的可见光响应, 也被广泛用于光催化-生物杂合系统的构建。Ye等人将CdS与产甲烷古菌中的巴氏甲烷八叠球菌 (*Methanosarcina barkeri*) 结合起

来, 构建了CdS-*M. barkeri*杂合系统, 在光驱动下实现了CO₂向CH₄的转化, CH₄产生速率达0.19 μmol/h, 量子效率为0.34%^[39]。Shi等人则将CdS与奥奈达希瓦氏菌 (*Shewanella oneidensis*) MR-1结合, 利用CdS产生的光激发电子驱动*S. oneidensis* MR-1的还原甘氨酸途径固定CO₂, 实现可持续的乙酸合成^[40]。需要特别指出的是, 当前大量关于PBS系统的基础研究主要聚焦于产氢、固碳等绿色制造领域。虽然这些研究的目标产物并非环境污染物, 但其在强化光激发电子的跨界传递、优化材料-生物界面结合方式等方面的核心机制, 对于构建高效的污染物降解PBS系统具有直接的机制借鉴意义。通过这些研究中核心机制的引入, 半导体纳米材料-生物杂合系统可通过光激发电子注入增强微生物的还原力, 为Cr⁶⁺、卤代有机物等难降解污染物的还原转化提供了高效、持续的驱动力。例如, Dong等人构建了Au (金)-TiO₂/*S. oneidensis*生物杂合系统, 利用该杂合系统实现了由可见光驱动下的Cr⁶⁺还原, 去除率达68.9%。该系统通过Au-TiO₂与*S. oneidensis*外膜蛋白OmcA的紧密结合形成稳定复合体, 光激发电子经导电蛋白吸收并传递到微生物胞内, 同时上调了OmcA和MtrC功能基因的表达, 从而强化了微生物的胞外电子传递能力^[41]。Yang等人构建了

CdS-腐败希瓦氏菌 (*Shewanella putrefaciens*) 生物杂合系统, 用于处理铀矿废水中的 U^{6+} 。该系统在实际铀矿废水中实现了超过 90% 的 U^{6+} 去除效率。机制研究表明, CdS 产生的光激发电子经 Mtr 电子传递路径传输至细菌胞内, 增强了胞内代谢活性, 并促进了胞外电子传递, 从而驱动吸附于细菌表面的 U^{6+} 高效还原为 U^{4+} 。转录组分析则进一步揭示, 该杂合系统中与 U^{6+} 还原密切相关的基因 (编码细胞色素 c、ABC 转运蛋白等) 均显著上调^[42]。

许多研究者对半导体纳米材料-生物杂合系统做了深入的研究。根据电子传递模式的不同, 该杂合系统可进一步划分为直接接触型、电子介体型和胞内自组装型三种模式, 三者对于污染物降解的传质效率和电子利用率各有不同^[43]。在直接接触型模式中, 光催化材料直接附着于微生物膜表面, 光生电子无需扩散介体即可注入胞内。当微生物表面存在能直接接收电子的物质^[44-47], 或利用膜上氢化酶、铁氧还蛋白、黄素蛋白、细胞色素、OmcB 等导电蛋白或导电鞭毛实现电子向胞内引入时^[48-50], 即可实现直接电子传递。Sakimoto 等通过在非光合细菌 *Moorella thermoacetica* (热醋穆尔氏菌) 表面自沉淀 CdS 纳米颗粒, 构建了 CdS NPs-*M. thermoacetica* 杂合系统。在此系统中, *M. thermoacetica* 代谢半胱氨酸产生的 S^{2-} 与外加 Cd^{2+} 反应, 在菌体表面原位合成 CdS 纳米颗粒。光照下 CdS 产生的光激发电子直接传递至胞内提供还原力, 经 Wood-Ljungdahl (还原性乙酰辅酶 A) 途径还原 CO_2 生产乙酸, 且随着微生物繁殖, 膜外 CdS 纳米颗粒可进行再沉淀, 表明该体系具备动态组装及自我修复能力^[7]。在污染物降解这一应用方面, Yang 等人构建了基于解脂耶氏酵母 (*Yarrowia lipolytica*) 的 CdS 生物杂合系统, 通过原位合成方式将生物相容性 CdS 纳米颗粒整合到修饰后的酵母细胞表面, 在紫外照射下 2 小时内实现了 100% 的 Cr^{6+} 还原。该系统的高活性归因于 CdS 与酵母细胞之间的高效电子传递, 光化学生成的超氧阴离子 ($\bullet O_2^-$) 被确认为促进 Cr^{6+} 还原的关键媒介^[51]。这种原位自沉淀的直接接触模式, 最大程度缩短了电子传递距离, 减少了电子在扩散过程中的能量损失, 因此具有较高的电子利用效率, 对于需要快速电子注入的污染物还原反应

(如 $Cr^{6+} \rightarrow Cr^{3+}$ 等) 尤为有利。

当光催化材料位于细胞之外且无法与微生物膜直接进行电子交换时, 则需借助电子介体完成电子穿梭。Honda 等人开发了 TiO_2 -重组 *E. coli* 杂合系统, 以甲基紫精 (methyl viologen, MV) 为电子介体, 实现了太阳光驱动的高效催化产氢^[52]。Rowe 等人同样以 MV 为电子介体, 将光激发电子转移至 *S. oneidensis* 中相应的酶, 无需酶纯化即可实现光驱动的多种化学品的选择性合成^[53]。在偶氮染料降解等方面, Wang 等人构建了 CdS 与脱色希瓦氏菌 (*Shewanella decolorationis*) 的杂合系统, 实现了偶氮染料苋菜红的光驱动降解。该系统在厌氧条件下, 光照 12 小时后对 40 mg/L 苋菜红的脱色率达 85% 以上。在该系统的电子传递过程中, CdS 在可见光下产生的光激发电子, 经核黄素等微生物自身分泌的电子介体穿梭传递至胞内, 驱动偶氮键的还原断裂^[54]。尽管电子介体型模式通过引入氧化还原穿梭体拓展了材料-微生物的兼容范围, 但介体的扩散限制及其潜在的生物毒性, 可能制约该模式在污染物降解中的实际应用。

胞内自组装型模式则是将光催化材料直接导入微生物细胞内部, 使光生电子在胞内产生并直接参与代谢途径, 从根本上消除了跨膜电子传递的阻力。Zhang 等人用金纳米簇 (Au NCs) 替代 CdS 纳米颗粒, Au NCs 具有更好的生物相容性, 且其较小的尺寸使其能够穿透细胞膜进入细胞内部, 显著提升了电子转移速率, 将连续固定 CO_2 过程的效率提高了 33%^[55]。该模式由于省去了跨膜电子传递步骤, 电子注入效率最高, 但如何平衡光催化材料对胞内代谢通路的潜在干扰, 是其走向污染物降解应用过程中需解决的关键问题。

1.2.2 光电极-生物杂合系统

除半导体纳米材料外, 光电极亦是构建非光敏微生物杂合系统的重要光催化平台。在光电极-生物杂合系统中, 光电极作为电子供体, 可向微生物持续提供电子或以氧化还原介质作为等效物参与胞内代谢转化, 从而强化微生物的氧化还原能力^[56]。与半导体纳米材料-微生物直接接触的模式相比, 光电极-生物杂合系统通常具有更大的反应界面和更灵活的电位调控空间, 电子在微生物与光电极之间的传递速率可通过外加偏压或光电

极表面修饰加以调控^[57]。

Kim 等人将甲醇适应型的卵形鼠孢菌 (*Sporomusa ovata*) 引入阴极半导体硅纳米线 (Si NWs) 阵列中, 构成光电极-生物杂合系统, 实现了高效 CO₂ 固定和多碳化合物的生产^[58]。这一工作展示了高比表面积电极阵列在增强微生物-光电极界面电子传递方面的优势。Liu 等人采用模块化工程策略, 在碳毡电极-*S. oneidensis* 基础上涂饰聚蒽醌与细菌纤维素气凝胶, 形成生物杂化电极。聚蒽醌的氧化还原活性与细菌纤维素气凝胶的三维多孔结构协同促进了微生物-光电极界面的电子传递, 使该杂合系统在 Cr⁶⁺ 还原和 CO₂ 还原合成有机酸等方面均表现出优异特性^[57]。该研究有力地证实了光电极-生物杂合系统在难降解有毒污染物 (如 Cr⁶⁺) 还原转化中的应用潜力, 其模块化设计也为后续利用合成生物学改造微生物提供了新的思路。Zhang 等人将棕色固氮菌 (*Azotobacter vinelandii*) 与聚多巴胺 (PDA) 封装的 NiO 纳米片 (NSs) 光电极连接。PDA 层具有优异的生物粘附活性、高导电性和良好生物相容性, 使大量的 *A. vinelandii* 被有效吸附在 PDA-NiO NSs 上形成杂合系统, 在保持微生物活力的同时, 诱导了胞内 NADH 和 ATP 浓度的增加, 促进了固氮酶基因 *nifH*、*nifD* 和 *nifK* 的表达, 最终实现 NH₃ 的高效连续合成^[59]。该体系所展示的“光电极表面修饰-微生物高效负载-胞内还原力增强”这一策略, 同样适用于设计面向污染物降解的光电极-生物杂合系统, 例如卤代有机物的还原脱卤。Aulenta 等人首次证明了固态电极结合低电位氧化还原介体中的 MV, 可向脱卤呼吸微生物高效传递电子, 驱动三氯乙烯 (TCE) 的还原脱氯, 最终将其转化为以乙烯为主的低毒终产物。他们也发现, 通过将 MV 修饰到光电极的表面, 脱氯菌甚至可直接从其表面接受还原当量^[60]。

综上, 无论是半导体纳米材料-生物杂合系统还是光电极-生物杂合系统, 其结构设计的核心均在于优化光激发电子向微生物胞内的传递效率, 并维持材料-微生物界面在降解运行期间的稳定性。不同的结构模式在传质效率、电子利用率、可控性和生物相容性方面各有优势与局限, 如何根据目标污染物的降解特性选择合适的构建模式,

并在此基础上通过材料改性和合成生物学手段进行理性优化, 是提升 PBS 降解效能的关键。

1.3 影响 PBS 降解效能的关键因素

基于非光敏微生物的 PBS 在实际污染物的降解应用中, 其效能受到多重因素的协同制约。这些因素主要来源于光催化材料、微生物、环境条件、电子介体和 PBS 系统结构设计这 5 个方面 (图 2)。

光催化材料和微生物在 PBS 中均发挥着至关重要的作用。其中, 光催化材料的性质, 包括 *Eg* 和形貌等, 能显著影响 PBS 的整体性能^[61]。*Eg* 决定了 PBS 系统吸收光能的范围, 进而影响到光伏转换效率和光激发电子产生效率^[62, 63]。Guo 等人采用了高效捕光的 InP (磷化铟) 纳米颗粒, 该纳米颗粒的带隙宽度比 CdS 纳米颗粒的更小, 能够更好地吸收可见光, 从而进一步提升微生物胞内的氧化还原能力^[64]。目前, 部分光催化材料对微生物是具有一定毒性的^[65, 66], 选择良好生物相容性的光催化材料将有利于 PBS 的设计与构建。有研究表明, 光催化材料与微生物的表面积之比可影响其对微生物的潜在毒性水平。Mutalik 和 Okoro 等人的研究就指出, 球形的 CuS (硫化铜) 纳米颗粒表现出极低的微生物毒性^[67, 68]。因此, 合理调控光催化材料的形貌, 优先采用低毒性结构, 是降低其微生物毒性、提升自身生物相容性的重要途径。此外, 微生物在 PBS 中扮演的角色也不容忽视。微生物通过自身的氧化还原、能量合成以及新陈代谢, 深入参与到 PBS 的全过程。它拥有以酶为基础的生物催化体系, 该催化体系的优点在于反应条件温和、反应特异性高、合成路线可设计和催化剂可自复制等等^[69-71], 为污染物的降解转化和化学品的绿色合成提供了有力保障。

环境条件中的 pH、温度和光照是影响 PBS 降解效能的主要参数, 其中光照的调控作用往往被低估^[72]。Yang 等人发现, 适当的光照强度可刺激氢氧化细菌的活性, 增强其电子传递能力、酶活性和能量利用率, 但过量的光照会引发代谢紊乱和脂质过氧化, 反而抑制微生物活性^[73]。此外, 不同波长的光对微生物的影响存在显著差异: 紫

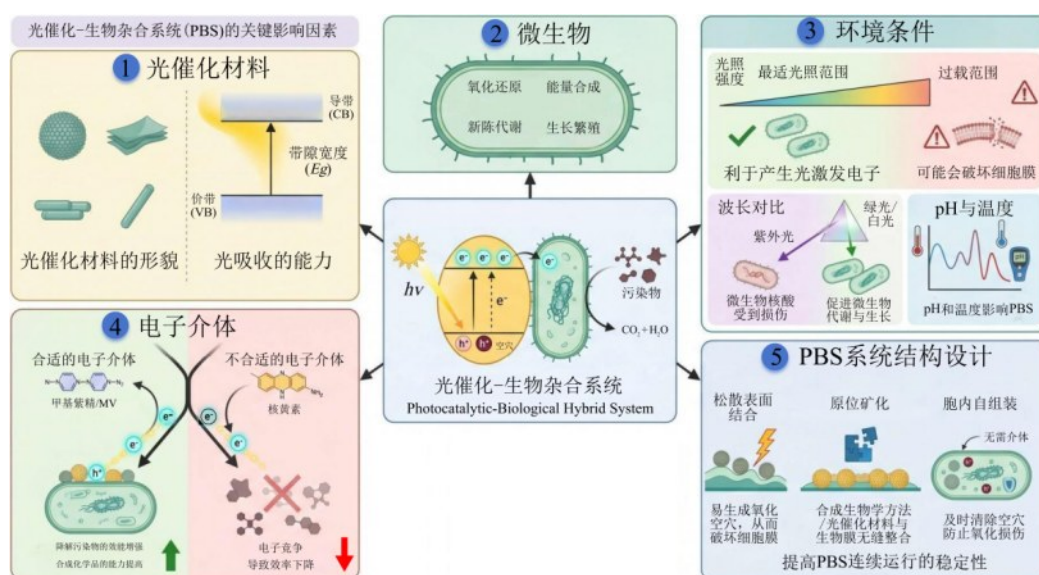


图2 基于非光敏微生物的光催化-生物杂合系统的影响因素

Fig. 2 Factors Influencing the Performance of Non-Photosynthetic Microorganism-Based Photocatalytic-Biological Hybrid Systems

外光通过破坏核酸而起到杀菌作用，而绿光和白光则可促进某些细菌的生长^[74]。在PBS降解污染物过程中，光照不仅驱动光催化材料产生电子，其强度和波长也直接调节微生物的代谢活性和耐受性。因此，针对特定目标污染物和微生物菌株，优化光照强度和波长组合，是保障其降解效能持续发挥的重要策略。此外，实际废水中pH和温度的波动对PBS降解稳定性的影响尚缺乏系统研究，这也是从实验室走向工程应用中需解决的关键问题之一。

在光催化材料与微生物无法直接进行电子交换的PBS构型中，电子介体成为影响电子传递效率、进而决定污染物降解速率的关键因素。电子介体通过在光催化材料表面接收光激发电子并穿梭传递至微生物胞内，桥接了两者之间的电子通路^[75]。PBS中常用的电子介体包括可溶性氧化还原物质（如MV、核黄素等）。研究证实，MV可作为高效电子介体，通过将光激发电子传递给微生物，显著促进PBS的氢气产量^[76]。然而，电子介体对PBS降解效能的调控并非总是正向的。例如，向PBS中添加核黄素反而降低了杂合系统降解罗丹明B和对氯苯酚的能力^[77, 78]。其原因可能在于，外源核黄素本身可作为光激发电子的竞争性受体，截留了本应流向目标污染物的电子，从

而降低了氧化还原效率。这一现象揭示了电子介体在PBS降解污染物中的两面性，即合适的介体类型和浓度可加速电子传递，而不当的介体选择则可能引入电子竞争路径，削弱系统的降解定向性。因此，在面向污染物降解的PBS设计中，需要慎重筛选电子介体，并兼顾其生物相容性和长期的氧化还原可逆性。

此外，光催化-生物杂合系统的结构设计也会对PBS本身产生影响。在许多研究的PBS中，光催化材料与微生物之间的界面通常构建于生物膜的表面之上，这种结合比较松散，并且也不均匀。而Wang等人采用合成生物学技术改造了*E. coli*的生物膜，使得该生物膜具备原位矿化能力，可利用周围环境中的成分在生物膜表面原位矿化出CdS纳米颗粒，构成了光催化-生物杂合系统。在此系统中，CdS纳米颗粒与生物膜无缝整合，通过化学键结合的方式使它们结合得十分紧密，分布也非常均匀。同时，这样的结构设计还避免了光生氧化空穴对细胞造成破坏^[14]。Cui等人通过对PBS的结构进行巧妙设计，开发出了一种紧密耦合的杂合系统，将*E. coli*的代谢能力与细胞内自组装的硒硫化镉纳米颗粒的光捕获能力整合起来，增强了产氢作用，并且该系统省去了用于跨膜电子传递

的电子介体,还能消耗光生空穴,从而减少空穴对微生物的氧化损伤并提高了系统连续运行的稳定性^[15]。这样的系统结构设计,既节约了资源,又增强了系统稳定性。同时,这也给降解污染物的PBS设计以启发,即理想的PBS结构应当在保证光激发电子高效注入微生物的前提下,最大化避免氧化损伤,从而实现难降解污染物长期稳定的还原转化。

综上所述,尽管光催化材料、微生物、环境条件及系统结构等多元因素均会对PBS的运行产生深远影响,但从系统的宏观角度来看,当前制约PBS高效降解污染物的核心瓶颈可进一步凝练为以下五个关键科学问题:一是光生电子产生效率不足,受限于材料带隙与光响应范围,导致初始能量输入受限;二是跨界界面电子传递受限,材料与微生物界面的高势垒及低亲和力导致界面电子传递阻力巨大;三是胞内电子利用率低,导入胞内的还原力易被非靶向的天然代谢途径竞争分流(即还原力争夺);四是降解代谢路径不完整,单菌体系通常难以彻底矿化复杂环境污染物,极易导致毒性中间产物累积;五是系统长期稳定性不足,光生空穴的氧化损伤及环境波动严重限制了体系的持续运行与工程化潜力。这五大核心科学问题不仅是当前PBS研究面临的严峻挑战,更是后续实施系统强化(如材料界面优化、电子传递链重构)与迈向理性设计(如合成微生物组构建)的根本出发点。

2 PBS强化污染物降解的应用进展与优化策略

随着合成生物学与材料科学等学科的交叉发展,目前基于非光敏微生物的PBS在污染物降解、治理等应用方面已取得了较好的进展。以下表3是对其简易的汇总。

当前,这些应用仍面临电子传递效率有限、降解路径不完整、系统稳定性不足等共性瓶颈。本章将按不同污染物的类型归纳典型应用案例,分析其面临的关键问题,阐述相应的优化策略,并为理性的PBS系统设计提供参考与思路。

2.1 抗生素

磺胺类抗生素是水体中常见的新污染物,磺胺嘧啶(SDZ)为其典型代表^[87]。Si等人在聚氨酯海绵载体上构建了g-C₃N₄(石墨相氮化碳)/TiO₂Z型异质结复合光催化材料,与微生物膜结合构成杂合系统。在模拟太阳光下,该系统对SDZ和常规污染物COD等均表现出良好的去除效果,且处理后的水体毒性明显减弱^[79]。

在PBS应用于抗生素降解的过程中,其面临的主要瓶颈包括中间产物毒性累积、复合污染条件下降解路径不完整等。对此,合成微生物组的构建便是核心优化路径之一。从合成生物学的角度来说,“单菌包办”模式难以应对复杂污染物组合,而理性设计的合成微生物组可实现代谢功能的空间解耦与协同互补。因此,在PBS的设计中,可运用合成生物学相关的方法,即构建“光电子捕获菌—降解执行菌”双菌体系:前者(如*S. oneidensis*)高效接收光催化材料产生的电子并转化为还原力,后者(如导入降解酶基因的工程菌)利用这些还原力进行污染物降解,通过代谢产物交换形成稳定互养关系。Gao等人搭建的*S. oneidensis*与铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)共培养体系已初步验证了这一思路——前者发挥“生物引擎”功能释放电子,后者利用电子驱动反硝化过程^[88]。利用单菌处理抗生素,由于抗生素本身具有抑菌活性,且单一菌株的降解路径往往不完整、易造成中间产物累积等,因此该设计范式可直接迁移至抗生素降解PBS,通过菌群分工降低单菌代谢负担、拓宽底物谱并增强环境适应性。

2.2 多环芳烃(PAHs)

多环芳烃(PAHs)通常是由不完全燃烧的化石燃料和有机材料所产生^[89],由于其高度致癌、致畸和致突变的特性,PAHs对生态环境和人体健康等方面构成了威胁^[90, 91]。菲(phenanthrene)便是PAHs中具有代表性的一种。Qin等人以聚四氰乙烯作为载体,在其上构建由多环芳烃降解菌与铜/氮共掺杂的TiO₂光催化剂所组成的杂合体系,再对菲进行降解。结果表明,该体系对菲具有较高的去除效率,同时也设置了不同组别进行比较,

表3 基于非光敏微生物的PBS在环境治理方面的相关应用

Table 3 PBS Based on Non-Photosynthetic Microorganisms for Environmental Governance

目标污染物	光催化材料	非光敏微生物	光源条件与反应时间	电子传递方式	降解/转化效果	体系局限性
抗生素	g-C ₃ N ₄ (石墨相氮化碳)/TiO ₂	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (铜绿假单胞菌)	模拟太阳光, 总运行 120 h	直接 接触型	降解磺胺嘧啶(SDZ)等 抗生素,减弱水体毒性,在 120 h 的连续运行实验中 SDZ 的平均去除率达到 79.31% ^[79]	对高浓度底物、过强光 照及酸性环境高度敏感, 易受抑制
重金属 离子	CdS	<i>Vibrio natriegens</i> (需钠弧菌)	模拟太阳光, 24~36 h	直接 接触型	去除废水中重金属离 子,去除率可达 99.92%, 并同步转化废水中的有机 物为高价值化学品 ^[80]	共存污染物易引发“还 原力竞争”干扰靶向去除, 且界面传质机制尚不完全 明确
微塑料	CDPCN(聚合氮化 碳)	<i>Methanosarcina barkeri</i> (巴氏甲烷八叠球菌)	模拟太阳光 (光暗循环), 24 d	直接 接触型	光暗循环下降解聚乳酸 (PLA)并高选择性产出甲 烷,其中杂合系统对 PLA 的去除率达到 99.1% ^[81]	高度依赖光暗循环条 件,还原力易被细胞内副 反应分流,此外实际应用 需配合高温预处理
碳污 染物	TiO ₂ /Si	<i>Methanosarcina barkeri</i>	可见光, 3~7 d	电子介 体型	高效捕获光能,还原固 碳并产甲烷,其污染物去 除效率达 86%,从而实现 对废气、碳污染物的资源 化利用 ^[82]	多组分电极易发生生物 腐蚀,并且电子介体在较 高的电子传递速率下因传 质受限,容易从电极表面 流失,导致去除效率下降
含硫废 水及重 金属 离子	CdS	<i>Halothiobacillus neapolitanus</i> (那不勒斯嗜盐硫杆菌)	可见光(间歇 光暗循环), 48~120 h	直接 接触型	可大幅提升脱硫效率, 其效率比纯细菌体系提高 了 129%;在处理模拟的镉 污染湖水时,在 48 小时内 对重金属离子 Cd ²⁺ 的去 除率可达 99.9% ^[83]	培养时需额外添加半胱 氨酸等前体,且过高浓度 的重金属离子会抑制微生 物的生长
偶氮 染料	MoS ₂ (二硫化钼)	<i>Raoultella planticola</i> (植生拉乌尔菌)	可见光,6 h	直接 接触型	降解水体污染物之一的 偶氮染料,具有良好的生 物脱色作用,在 6 小时内 对甲基橙的脱色效率最高 可达 96.18% ^[84]	高浓度纳米材料易发生 团聚并破坏细胞膜,且降 解产生的中间产物易积累 从而毒害细胞
抗生素	CdS	<i>Shewanella oneidensis</i>	可见光,18 h	直接 接触型	在 18 小时内可将 20 mg/L 的氯霉素完全降解, 降解率达到 100%,能够有 效处理因过度排放氯霉素 所引起的环境污染 ^[85]	杂合系统长期运行后稳 定性受限(第 4 次循环后 效率骤降),并且过量的 CdS 对微生物具有毒性, 会抑制代谢过程的进行, 导致降解效率迅速下降
含氮废 水	CdSe _x S _{1-x} QDs(硒 硫化镉量子点)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	模拟太阳光 (间歇光暗循 环),36~48 h	胞内自组 装型	增强废水反硝化作用, 能对废水进行有效脱氮, 解决水体富营养化问题, 例如在处理实际的市政污 水、水产养殖废水和电镀 废水时,硝酸盐的去除率 分别达到 73.5%、82.8% 和 62.6%,均显著优于对 照组 ^[86]	杂合系统长期循环运行 的过程中其活性易衰减, 且实际废水的高盐度会产 生代谢抑制

得出不同组别对于菲的去除效率排序为：UV-MB（紫外光生物膜-光催化剂）：88.6% > V-MB（可见光生物膜-光催化剂）：84.3% > UV-M（紫外光无生物膜-光催化剂）：81.4% > V-M（可见光无生物膜-光催化剂）：78.4% > B（无光催化剂-纯生物降解）：13.0% > C（对照组）：4.0%，这直观体现出

光催化-生物系统协同降解的优势^[92]。

利用PBS降解PAHs所面临的挑战主要包括疏水性底物的生物可利用性低、光催化材料与降解菌之间的电子传递路径较长。针对疏水性底物的生物可利用性问题,底盘工程提供了相应的解决途径。Su等人基于需钠弧菌(*Vibrio natriegens*)构建的多污染物降解底盘体系,通过整合外排泵系统与PAHs降解基因簇,并利用多个基因组中性位点实现了长达43 kb基因簇的稳定整合,最终获得了可同时降解多种芳香烃污染物的工程菌株^[93]。在此基础上,若将该底盘与光催化材料耦合构建PBS,可利用光激发电子为PAHs降解通路提供额外驱动力,同时外排泵系统有助于缓解中间产物毒性累积问题,为高效降解PAHs提供了“模块化通路+标准化底盘”的设计框架。未来还可借鉴合成生物学手段调控降解菌的表面疏水性和胞外聚合物组成,以增强菌株对PAHs的富集与摄取能力。

而对于光催化材料与降解菌之间的电子传递路径较长这一问题,界面优化是缩短电子传递距离、降低界面势垒的有效策略。Ye等人设计的NiCu(镍铜)合金界面层位于CdS与*M. barkeri*之间,其中的Ni-Cu-Cu空心位点可直接为菌体提供氢原子和电子,使CH₄产率达到100%,量子效率为12.41%^[94]。Song等人则以Ru(钌)单原子桥连接多孔g-C₃N₄与*S. oneidensis*,该单原子桥促进了电荷分离并降低了界面电子转移势垒,使产氢效率较未修饰体系提升了47.5倍,量子效率达8.46%^[95]。这些在太阳能化学转化中得到验证的界面工程策略,为破解PAHs降解中的电子传递瓶颈提供了明确的思路,即通过单原子桥或合金界面层强化光催化材料与降解菌之间的电子耦合,进而提升降解速率。

2.3 金属离子

在无机污染物治理方面,PBS已展现出显著的应用潜力。Pi等人利用合成生物学手段在*V. natriegens*中引入H₂S好氧合成途径,使菌株能够直接利用废水中的硫酸盐产生H₂S,并与金属离子结合在细胞表面原位生成CdS纳米颗粒,构成自

组装型PBS。该系统对废水中金属离子的去除率高达99%,同时提高了2,3-丁二醇(BDO)的产量,实现了污染物向高价值化学品的转化^[80]。Zuo等人构建的CdS-苏云金杆菌(*Bacillus thuringiensis*)杂合系统则可在光照下还原Cr⁶⁺为Cr³⁺,并将As³⁺氧化为As⁵⁺,实现了多种有毒金属离子的协同处理^[96]。

然而,上述系统面临光激发电子注入效率有限、金属离子竞争电子等瓶颈,限制了无机污染物还原转化速率的进一步提升。针对这些问题,相关研究者从光催化材料优化和电子传递链重构这两个方向进行了系统强化。在光催化材料方面,量子点(QDs)因其量子限域效应和高表面活性位点密度而被广泛用于提升光生电子的产生与转移效率^[97]。Guan等人利用CdTe(碲化镉)QDs与自养黄色杆菌(*Xanthobacter autotrophicus*)构建杂合系统,在光驱动下CO₂固定的内部量子效率达47.2%^[98];Ding等人通过ZnS(硫化锌)壳层和半胱氨酸两性离子配体修饰QDs,显著提升了其氧化还原电位与生物相容性,使QDs能够被不同细菌吸收并锚定至目标酶^[99]。异质结工程同样提供了有效方案,Gai等人报道了以*M. thermoacetica*这种细菌作为基础,并用茚二亚胺衍生物(PDI)和p型聚芴衍生物(PFP)覆盖在其表面,形成p-n异质结,在光照下可实现光催化作用的同时,也具有较高的光激发电子-空穴分离效率。在这样的杂合系统中,PDI/PFP能够产生光激发电子,诱导*M. thermoacetica*通过Wood-Ljungdahl途径驱动CO₂转化生成乙酸,其光利用率可达1.6%^[100];Jiang等人设计了一种银铟硫/硫化铟(AgInS₂/In₂S₃)异质结,使其在*E. coli*表面进行沉积构成杂合系统。AgInS₂/In₂S₃异质结可以有效抑制光激发电子与空穴的复合,从而促进了*E. coli*持续制氢的能力,在720 nm光照下其量子效率达到3.3%^[101]。这些材料优化策略的核心都是通过提升光激发电子产生效率和抑制电荷复合来增强还原的驱动力。

在电子传递链重构方面,强化跨膜电子传递是提升重金属还原速率的关键。以*S. oneidensis*的MtrCAB复合物为核心的天然电子通道,可通过过表达CymA、MtrA等关键组分来增强跨膜电子通量^[102]。除蛋白工程路径外,纳米材料介导的“电

子桥”策略也提供了新思路——Feng等人通过适应性进化使产琥珀酸放线杆菌 (*Actinobacillus succinogenes*) 在胞内原位合成Au纳米颗粒, 这些导电纳米结构有效降低了跨膜传递阻力, 在光电极耦合体系中将CO₂转化效率提升至67%^[103]。此外, 电子传递链的模块化组装可将多个功能模块协同集成。例如, 通过引入硫还原地杆菌 (*Geobacter sulfurreducens*) 的外膜细胞色素OmcF构建高导电跨膜通道、筛选高效氢酶并在周质中强化表达、在细胞表面构建rGO高速导电网络, 最终在*S. oneidensis*中实现了约643 μmol/mg的产氢量^[102]。这一系统优化方式同样适用于无机污染物降解体系的电子传递强化。

2.4 微塑料

微塑料作为新兴污染物, 其难降解特性给传统处理技术带来了挑战。Ye等人将*M. barkeri*与碳点功能化的聚合氮化碳(CDPCN)结合构建杂合系统, 在热预处理和外源CO₂辅助下有效降解聚乳酸(PLA)微塑料, 甲烷生成选择性接近100%。在模拟昼夜光暗循环条件下, 光照期产生的有机中间产物(丙酮酸、乙酸等)可被黑暗期的菌体持续利用, 使CH₄产量在完整周期内持续增加^[94]。

目前PBS在应用过程中, 遇到的瓶颈有产物选择性与光暗循环条件等仍需优化。从机制上看, 这一问题与光激发电子在胞内的分配路径密切相关, 即光照期产生的还原力(如NADH)若被多条竞争性代谢途径分流, 则供给目标降解反应的电子通量不足, 导致降解效率受限或副产物的产生。因此, 通过电子传递链定向调控将还原力优先导向目标酶, 是提升微塑料降解效能的关键策略。研究表明, 在底盘细胞中共表达铁氧还蛋白(Fd)、Fd-NAD(P)⁺还原酶(FNR)及目标酶, 可从NADH到目标酶构建一条“专属电子通道”, 实现电子的定向引流和还原力重分配。这种“还原力重分配”的策略在碳转化研究中已展现出巨大潜力, 例如Yu等人通过模块化设计构建了人工电子传递链(NADH→FNR→Fd→甲酸脱氢酶), 将还原力从竞争性路径(如乳酸发酵)重新分配至CO₂还原反应, 使甲酸转化效率提升6.8倍^[104]。该

策略的核心价值在于解决了“还原力争夺”这一共性问题, 也就是当底盘细胞内存在多条竞争性代谢路径时, 通过人工电子传递链将还原力定向供给目标反应, 可有效提升产物选择生成率与反应效率。因此, 借鉴上述人工电子传递链的设计思路, 在利用PBS降解污染物的过程中, 如何通过电子传递链的定向设计来规避“还原力争夺”问题, 将是提升产物选择性与系统效率的重要优化方向。

3 展望与挑战: 从功能组装到理性设计

基于非光敏微生物的PBS在诸多污染物(如抗生素、PAHs、农药、微塑料等)的转化与降解方面均已取得阶段性进展。针对应用过程中暴露的光激发电子注入与定向传递效率不足、降解路径不完整、单菌体系处理复合污染能力有限等瓶颈, 现有研究从光催化材料优化、电子传递链重构、合成微生物组构建及界面工程等角度, 在“材料—单菌—菌群”三个层面形成了系统性的强化框架。然而, 从整体来看, PBS仍停留在“材料-微生物简单耦合”的功能验证阶段, 其构建过程在很大程度上依赖经验性组合, 缺乏统一的设计原则。因此, 如何将PBS从“功能组装”推进至“理性设计”, 将是未来发展的核心问题。而合成微生物组正是实现这一转变的关键载体——它将电子流调控、代谢适配、界面优化与工程放大统一于一个可设计的群落框架之中。围绕这一核心思路, 未来PBS的系统设计应重点从以下三个层面推进。

(1) 群落内部的电子流与代谢流定向调控

从能量利用角度来看, 光激发电子在PBS中的产生、传递与分配过程构成了系统运行的主导逻辑。然而, 天然微生物内部复杂的电子传递网络往往具有显著的分支结构, 使得外源输入的电子在胞内发生非定向分流, 难以高效汇聚至目标反应通路。这种“电子流失控”现象已成为制约PBS效率提升的关键瓶颈。同时, 异源降解通路的引入虽赋予了PBS处理复杂污染物的能力, 但多基因通路的表达会对宿主细胞造成显著的代谢负担, 且光生电子作为非天然还原力来源, 其供给

节律与细胞内源性代谢需求之间常存在不匹配,导致通路效率受限甚至中间产物积累。因此,未来研究不应仅从单菌内部的电子传递链优化入手,而应将其上升到群落层面进行设计:通过“光电子捕获菌”与“降解执行菌”的功能分工,前者高效接收光生电子并生成还原力载体(如NADH、甲酸等),后者利用这些还原力驱动特定的污染物降解通路。这种分工既能降低单菌的代谢负担,又可通过还原力载体的种类和供给速率来定向控制群落的代谢流向,使电子流与代谢流从“多路径竞争”转变为“定向供给”,最终实现与目标降解过程的精准耦合。

(2) 群落-材料界面的协同适配

PBS作为典型的“材料-生物”跨界体系,其性能在很大程度上取决于界面层面的耦合效率。现有研究多集中于提升光催化材料本身的性能或改善其与微生物的接触方式,但整体上仍缺乏从群落角度出发的界面设计思路。事实上,界面不仅是电子传递的物理通道,同时也是调控物种富集与群落结构的重要节点。因此,未来有必要从群落-材料协同的角度重新审视界面设计:一方面通过单原子桥、合金界面层等手段降低电子传递势垒,另一方面利用界面化学修饰选择性富集目标功能菌,主动塑造群落的物种组成与代谢分工,使界面真正成为连接光能输入与生物催化输出的可控调控单元。

(3) 面向真实场景的群落稳定性与工程化转化

尽管PBS已在实验室条件下展现出良好的应用潜力,但其距离实际应用仍存在显著差距。系统在长期运行过程中的稳定性、复杂环境下的适应能力以及整体运行成本,均是制约其规模化推广的关键因素。此外,光照条件波动、材料失活及微生物群落演替等因素的叠加,也使PBS在真实环境中的行为更加复杂。合成微生物组因具有功能冗余和种间互养等特性,相较单一菌株能够更好地应对上述复杂条件。未来研究需依托“设计-构建-测试-学习”(DBTL)循环,综合多组学数据与计算模型,迭代优化群落结构、光暗匹配策略及反应器设计,并逐步将生物安全评估纳入考量,从而推动PBS由实验体系向实际污染场景

的应用转化。

作者贡献声明:贾伟彬、许玫英:提出概念、基本框架、提出研究方向、设计论文框架;姚智凯、贾伟彬、许玫英:设计研究思路、设计研究方案、研究方案可行性调查分析、实施研究过程;姚智凯、谭小萍、李吉宏:文献调研与整理姚智凯、贾伟彬:确定研究对象范围、收集数据、采集、清洗与分析数据;姚智凯、贾伟彬:承担技术开发、绘制图谱姚智凯、陈乐天、许玫英:起草论文、修订论文、审核论文姚智凯、贾伟彬、许玫英:参与论文修订、论文最终版本修订

所有作者均已阅读并同意文章的已发布版本。

利益冲突:没有利益冲突。

参 考 文 献

- [1] Li R, Zhu L, Yang K, et al. Impact of urbanization on antibiotic resistome in different microplastics: evidence from a large-scale whole river analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021 (55): 8760-8770.
- [2] Wang Y, Yang Y, Liu X, et al. Interaction of microplastics with antibiotics in aquatic environment: distribution, adsorption, and toxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021 (55): 15579-15595.
- [3] Niu L, Liu W, Juhasz A, et al. Emerging contaminants antibiotic resistance genes and microplastics in the environment: introduction to 21 review articles published in crest during 2018-2022 [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2022 (52): 4135-4146.
- [4] Satish G, Ashokrao D M, Arun S K. Microbial degradation of pesticide: a review [J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2017 (11): 992-1012.
- [5] Mishra T, Tiwari P B, Kanchan S, et al. Advances in microbial bioremediation for effective wastewater treatment [J]. *Water*, 2025 (17): 3196.
- [6] Dangi A K, Sharma B, Hill R T, et al. Bioremediation through microbes: systems biology and metabolic engineering approach [J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2019 (39): 79-98.
- [7] Sakimoto K K, Wong A B, Yang P. Self-photosensitization of nonphotosynthetic bacteria for solar-to-chemical production [J]. *Science*, 2016 (351): 74-77.
- [8] Song W, Quek G, Short M I, et al. Designing microbe-semiconductor interfaces for semibiological photosynthesis [J]. *Chemical Reviews*, 2026 (126): 4656-4705.

- [9] Yu Y, Guo S, Lv S, et al. Eradicating the photogenerated holes in a photocatalyst-microbe hybrid system: a review [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024 (16): 56545-56554.
- [10] Fang X, Kalathil S, Reisner E. Semi-biological approaches to solar-to-chemical conversion [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020 (49): 4926-4952.
- [11] Wang X, Li H, Wang K, et al. Photoelectron-driven modulation of carbon metabolism enhances hydrogen production in a ZnIn_2S_4 -*Shewanella oneidensis* biohybrid system [J]. *Bioresource Technology*, 2026 (448): 134285.
- [12] Dong G, Wang H, Yan Z, et al. Cadmium sulfide nanoparticles-assisted intimate coupling of microbial and photoelectrochemical processes: mechanisms and environmental applications [J]. *Science of the Total Environment*, 2020 (740): 140080.
- [13] Dong G, Chen Y, Yan Z, et al. Recent advances in the roles of minerals for enhanced microbial extracellular electron transfer [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020 (134): 110404.
- [14] 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): eabm7665.
- [15] Cui S, Tian L, Li J, et al. Light-assisted fermentative hydrogen production in an intimately-coupled inorganic-bio hybrid with self-assembled nanoparticles [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022 (428): 131254.
- [16] Pan X, Li W, Fang Y, et al. Semi-artificial photosynthetic system based on TiO_2 /chlorophyll composite and microalgae for N_2 fixation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023 (475): 146179.
- [17] 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): 529-549.
- [18] Wu D, Zhang W, Fu B, et al. Living intracellular inorganic-microorganism biohybrid system for efficient solar hydrogen generation [J]. *Joule*, 2022 (6): 2293-2303.
- [19] Cestellos-Blanco S, Zhang H, Kim J M, et al. Photosynthetic semiconductor biohybrids for solar-driven biocatalysis [J]. *Nature Catalysis*, 2020 (3): 245-255.
- [20] Wang X, Chen L, Liu T, et al. Rgo-augmented photosynthetic biohybrid system for biohydrogen production: regulatory mechanisms and wastewater treatment applications [J]. *ACS ES&T Engineering*, 2024 (5): 932-941.
- [21] 宋浩, 张妍, 刘其敬. 无机纳米材料-微生物杂合系统的研究进展[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2026 (59): 1-16.
SONG Hao, ZHANG Yan, LIU Qijing. Research progress of inorganic nanomaterial-microorganism hybrid systems[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2026 (59): 1-16.
- [22] 王凯冲, 汪涵, 王亚宜. 基于半导体和微生物的光驱动全细胞杂合体研究[J]. *化学进展*, 2025 (37): 157-172.
WANG Kaichong, WANG Han, WANG Yayi. Research on light-driven whole-cell hybrids based on semiconductors and microorganisms[J]. *Progress in Chemistry*, 2025 (37): 157-172.
- [23] 邹雨泰, 王文硕, 刘健. 聚合物-微生物杂合体的构建及催化应用[J]. *化学进展*, 2024 (36): 815-826.
ZOU Yutai, WANG Wenshuo, LIU Jian. Construction and catalytic applications of polymer-microorganism hybrids[J]. *Progress in Chemistry*, 2024 (36): 815-826.
- [24] Liang J, Xiao K, Wang X, et al. Revisiting solar energy flow in nanomaterial-microorganism hybrid systems [J]. *Chemical Reviews*, 2024 (124): 9081-9112.
- [25] Zhao S, Liu Q, Li Y, et al. The role of semi-artificial photosynthetic systems in energy and environmental solutions: a critical review [J]. *Biofuel Research Journal*, 2024 (11): 2082-2098.
- [26] Li J, Wang F, Zhang J, et al. Inward-to-outward assembly of amine-functionalized carbon dots and polydopamine to *Shewanella oneidensis* MR-1 for high-efficiency, microbial-photoreduction of Cr (VI) [J]. *Chemosphere*, 2022 (307): 135980.
- [27] Tao M, Jin C, Lu H, et al. Living and regenerative material encapsulating self-assembled *Shewanella oneidensis*-CdS hybrids for photocatalytic biodegradation of organic dyes [J]. *Microorganisms*, 2022 (10): 2501.
- [28] Gao F, Liu G, Chen A, et al. Artificial photosynthetic cells with biotic-abiotic hybrid energy modules for customized CO_2 conversion [J]. *Nature Communications*, 2023 (14): 6783.
- [29] Zhang L, Wang Y. Decoupled artificial photosynthesis [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023 (62): e202219076.
- [30] Wang H, Zhang L, Chen Z, et al. Semiconductor heterojunction photocatalysts: design, construction, and photocatalytic performances [J]. *Chemical Society Reviews*, 2014 (43): 5234-5244.
- [31] Xiao Y, Qian Y, Chen A, et al. An artificial photosynthetic system with CO_2 -reducing solar-to-fuel efficiency exceeding 20% [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020 (8): 18310-18317.
- [32] Kudo A, Miseki Y. Heterogeneous photocatalyst materials for water splitting [J]. *Chemical Society Reviews*, 2009 (38): 253-278.
- [33] Mussgnug J H, Thomas Hall S, Rupprecht J, et al. Engineering photosynthetic light capture: impacts on improved solar energy to biomass conversion [J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2007 (5): 802-814.

- [34] Liu C, Gallagher J J, Sakimoto K K, et al. Nanowire-bacteria hybrids for unassisted solar carbon dioxide fixation to value-added chemicals [J]. *Nano Letters*, 2015 (15): 3634-3639.
- [35] Li J, Zhang M, Li Q, et al. Enhanced visible light activity on direct contact Z-scheme $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{-TiO}_2$ photocatalyst [J]. *Applied Surface Science*, 2017 (391): 184-193.
- [36] Jiang X, Duan Y, Tian Y, et al. Facile one-pot hydrothermal method to prepare Sn (II) and N co-doped TiO_2 photocatalyst for water splitting under visible light irradiation [J]. *Rare Metals*, 2022 (41): 406-414.
- [37] Zhang D, Xu G, Chen F. Hollow spheric $\text{Ag-Ag}_2\text{S/TiO}_2$ composite and its application for photocatalytic reduction of Cr (VI) [J]. *Applied Surface Science*, 2015 (351): 962-968.
- [38] Lv X, Huang W, Gao Y, et al. Boosting solar hydrogen production via electrostatic interaction mediated *E.coli*- TiO_2 —x biohybrid system [J]. *Nano Research*, 2024 (17): 5390-5398.
- [39] 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.
- [40] 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): e202412072.
- [41] Dong H, Yang Q, Yang Z, et al. Enabling high-efficiency plasmon-induced visible-light-driven reduction of hexavalent chromium with $\text{Au-TiO}_2\text{/Shewanella}$ biohybrid [J]. *Applied Surface Science*, 2025 (684): 161822.
- [42] 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): 4606-4616.
- [43] Shi S, Zeng C, Si T, et al. Photobiocatalytic solar fuel and solar chemical conversion: sufficient activity and better selectivity [J]. *ACS ES&T Engineering*, 2022 (2): 989-1000.
- [44] Liu G, Gao F, Zhang H, et al. Biosynthetic CdS-*Thiobacillus thioparus* hybrid for solar-driven carbon dioxide fixation [J]. *Nano Research*, 2023 (16): 4531-4538.
- [45] Wang X, Niu M, Fan J, et al. Photoelectric bacteria enhance the in situ production of tetrodotoxin for antitumor therapy [J]. *Nano Letters*, 2021 (21): 4270-4279.
- [46] Kracke F, Vassilev I, Krömer J O. Microbial electron transport and energy conservation-the foundation for optimizing bioelectrochemical systems [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015 (Volume 6-2015).
- [47] Filman D J, Marino S F, Ward J E, et al. Cryo-em reveals the structural basis of long-range electron transport in a cytochrome-based bacterial nanowire [J]. *Communications Biology*, 2019 (2): 219.
- [48] Krige A, Sjöblom M, Ramser K, et al. On-line raman spectroscopic study of cytochromes' redox state of biofilms in microbial fuel cells [J]. *Molecules*, 2019 (24): 646.
- [49] Liu S, Yi X, Wu X, et al. Internalized carbon dots for enhanced extracellular electron transfer in the dark and light [J]. *Small*, 2020 (16): 2004194.
- [50] Huang S, Tang J, Liu X, et al. Fast light-driven biodecolorization by a *Geobacter sulfurreducens*-CdS biohybrid [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019 (7): 15427-15433.
- [51] Yang K, Wei W, Xie X, et al. Harnessing solar energy for the photocatalytic reduction of hexavalent chromium: a high-performance *Yarrowia lipolytica*-CdS biohybrid system [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025 (17): 28327-28335.
- [52] 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): 400-406.
- [53] Rowe S F, Le Gall G, Ainsworth E V, et al. Light-driven H_2 evolution and $\text{C}=\text{C}$ or $\text{C}=\text{O}$ bond hydrogenation by *Shewanella oneidensis*: a versatile strategy for photocatalysis by nonphotosynthetic microorganisms [J]. *ACS Catalysis*, 2017 (7): 7558-7566.
- [54] 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): 447-457.
- [55] Zhang H, Liu H, Tian Z, et al. Bacteria photosensitized by intracellular gold nanoclusters for solar fuel production [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018 (13): 900-905.
- [56] Rabaey K, Rozendal R A. Microbial electrosynthesis-revisiting the electrical route for microbial production [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010 (8): 706-716.
- [57] Liu Q, Xu W, Ding Q, et al. Engineering *Shewanella oneidensis*-carbon felt biohybrid electrode decorated with bacterial cellulose aerogel-electropolymerized anthraquinone to boost energy and chemicals production [J]. *Advanced Science*, 2024 (11): 2407599.
- [58] Kim J, Cestellos-Blanco S, Shen Y, et al. Enhancing biohybrid CO_2 to multicarbon reduction via adapted whole-cell catalysts [J]. *Nano Letters*, 2022 (22): 5503-5509.
- [59] Zhang Y, Feng T, Zhou X, et al. Photoelectrocatalytic-microbial biohybrid for nitrogen reduction [J]. *Advanced Materials*, 2024 (36): 2407239.
- [60] Aulenta F, Catervi A, Majone M, et al. Electron transfer from a solid-state electrode assisted by methyl viologen sustains efficient microbial reductive dechlorination of TCE [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007 (41): 2554-2559.
- [61] Jiang Y, Tian B. Inorganic semiconductor biointerfaces [J].

- Nature Reviews Materials, 2018 (3): 473-490.
- [62] Weliwatte N S, Minter S D. Photo-bioelectrocatalytic CO₂ reduction for a circular energy landscape [J]. *Joule*, 2021 (5): 2564-2592.
- [63] Yang P. Liquid sunlight: the evolution of photosynthetic biohybrids [J]. *Nano Letters*, 2021 (21): 5453-5456.
- [64] Guo J, Suástegui M, Sakimoto K K, et al. Light-driven fine chemical production in yeast biohybrids [J]. *Science*, 2018 (362): 813-816.
- [65] Xiong J, Cao Y, Zhao H, et al. Cooperative antibacterial enzyme-Ag-polymer nanocomposites [J]. *ACS Nano*, 2022 (16): 19013-19024.
- [66] 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): 9893-9914.
- [67] Mutalik C, Okoro G, Krisnawati D I, et al. Copper sulfide with morphology-dependent photodynamic and photothermal antibacterial activities [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022 (607): 1825-1835.
- [68] Okoro G, Husain S, Saukani M, et al. Emerging trends in nanomaterials for photosynthetic biohybrid systems [J]. *ACS Materials Letters*, 2022 (5): 95-115.
- [69] Kornienko N, Zhang J Z, Sakimoto K K, et al. Interfacing nature's catalytic machinery with synthetic materials for semi-artificial photosynthesis [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018 (13): 890-899.
- [70] Ko Y, Kim J W, Lee J A, et al. Tools and strategies of systems metabolic engineering for the development of microbial cell factories for chemical production [J]. *Chemical Society Reviews*, 2020 (49): 4615-4636.
- [71] Buller R, Lutz S, Kazlauskas R J, et al. From nature to industry: harnessing enzymes for biocatalysis [J]. *Science*, 2023 (382): eadh8615.
- [72] Yu M, Wang J, Tang L, et al. Intimate coupling of photocatalysis and biodegradation for wastewater treatment: mechanisms, recent advances and environmental applications [J]. *Water Research*, 2020 (175): 115673.
- [73] Yang M, Qiu S, Wang L, et al. Effect of short-term light irradiation with varying energy densities on the activities of nitrifiers in wastewater [J]. *Water Research*, 2022 (216): 118291.
- [74] Kamel F H, Saeed C H, Hassan N I. Comparative effect of different visible light energy on bacterial growth [J]. *International Journal of Advanced Research*, 2016 (4): 263-270.
- [75] Pavliuk M V, Cai B, Kurth L, et al. Organic materials for biohybrid photocatalysis and photoelectrochemical devices [J]. *Chemical Reviews*, 2026 (126): 5877-5919.
- [76] Honda Y, Hagiwara H, Ida S, et al. Application to photocatalytic H₂ production of a whole-cell reaction by recombinant *Escherichia coli* cells expressing [FeFe] - hydrogenase and maturases genes [J]. *Angewandte Chemie*, 2016 (128): 8177-8180.
- [77] Xiao X, Ma X, Liu Z, et al. Degradation of rhodamine B in a novel bio-photoelectric reductive system composed of *Shewanella oneidensis* MR-1 and Ag₃PO₄ [J]. *Environment International*, 2019 (126): 560-567.
- [78] Liu P, Ma X, Li T, et al. Elucidation of photodegradation of p-chlorophenol in a biophotoelectric reductive degradation system by density functional theory calculations [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020 (151): 104969.
- [79] Si Q, Feng X, Teng Y, et al. Constructing effective and low-toxic removal of combined contaminants by intimately coupled Z-scheme heterojunction photocatalysis and biodegradation system [J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2025 (365): 124909.
- [80] Pi S, Yang W, Feng W, et al. Solar-driven waste-to-chemical conversion by wastewater-derived semiconductor biohybrids [J]. *Nature Sustainability*, 2023 (6): 1673-1684.
- [81] 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*, 2022 (134): e202213244.
- [82] Nichols E M, Gallagher J J, Liu C, et al. Hybrid bioinorganic approach to solar-to-chemical conversion [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2015 (112): 11461-11466.
- [83] Zhang Y, Fang F, Qian X, et al. Semiconductor biohybrids for enhanced bifunctional wastewater sulfur and heavy metal removal [J]. *Green Chemistry*, 2024 (26): 3940-3948.
- [84] Wen X, Hou Y, Guo J, et al. Mechanistic insight into enhanced methyl orange degradation by *Raoultella planticola*/MoS₂ biohybrid: implication for electron transfer and microbial metabolism [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024 (469): 143201.
- [85] 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.
- [86] Cui S, Si Y, Fu X, et al. Intracellularly-photosensitized biohybrid with biogenic quantum dots for enhanced wastewater denitrification [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023 (457): 141237.
- [87] Zhang Y, Xie J, Liu M, et al. Microbial community functional structure in response to antibiotics in pharmaceutical wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2013 (47): 6298-6308.
- [88] Gao T, Li Y, Dai K, et al. Electric syntrophy-driven modulation

- of Fe⁰-dependent microbial denitrification [J]. *Water Research*, 2025 (268): 122722.
- [89] Zhao Z, Omer A A, Qin Z, et al. Cu/N-codoped TiO₂ prepared by the sol-gel method for phenanthrene removal under visible light irradiation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020 (27): 17530-17540.
- [90] Franco S S, Nardocci A C, Günther W M R. Pah biomarkers for human health risk assessment: a review of the state-of-the-art [J]. *Cadernos de Saúde Pública*, 2008 (24): a569-a580.
- [91] Moscoso F, Teijiz I, Deive F J, et al. Efficient pahs biodegradation by a bacterial consortium at flask and bioreactor scale [J]. *Bioresource Technology*, 2012 (119): 270-276.
- [92] 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.
- [93] Su C, Cui H, Wang W, et al. Bioremediation of complex organic pollutants by engineered vibrio natriegens [J]. *Nature*, 2025 (642): 1024-1033.
- [94] 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): 6612.
- [95] Song W, Liu Y, Wu Y, et al. Single-atom bridges across biotic-abiotic interfaces facilitate direct electron transfer for solar-to-chemical conversion [J]. *Nature Communications*, 2025 (16): 6708.
- [96] 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.
- [97] Sun P, Xing Z, Li Z, et al. Recent advances in quantum dots photocatalysts [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023 (458): 141399.
- [98] Guan X, Erşan S, Hu X, et al. Maximizing light-driven CO₂ and N₂ fixation efficiency in quantum dot-bacteria hybrids [J]. *Nature Catalysis*, 2022 (5): 1019-1029.
- [99] 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): 10272-10282.
- [100] 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): 7224-7229.
- [101] Jiang Z, Wang B, Jimmy C Y, et al. AgInS₂/In₂S₃ heterostructure sensitization of *Escherichia coli* for sustainable hydrogen production [J]. *Nano Energy*, 2018 (46): 234-240.
- [102] Xu W, Liu Q, Ding Q, et al. Modular engineering a *Shewanella oneidensis*-CdS@ rgo artificial photosynthetic biohybrid to accelerate photoelectron transfer and conversion for enhanced hydrogen production [J]. *Green Chemistry*, 2025 (27): 12389-12402.
- [103] Feng T, Zhou X, Zhang Y, et al. Photoelectrocatalytic-microbial biohybrid for succinic acid synthesis [J]. *Nature Communications*, 2026.
- [104] Yu X, Li H, Bao S, et al. Self-assembled protein cages in living bacterial photocatalysis: modular design achieves selective regeneration of NADH and efficient CO₂ fixation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2026 (36): e13487.



通讯作者: 贾伟彬(1992—),男,助理研究员,研究方向为有机污染物的微生物降解机制解析与环境修复。
E-mail: jiaweibin@gdim.cn



第一作者: 姚智凯(2001—),男,硕士研究生。研究方向为环境中有机污染物的微生物降解。
E-mail: yaozhikai@gdim.cn