

# 光合细菌的固定化、资源回收及发展前景综述

申向禹 孔志辉 郭昊祎 王文霄

华北水利水电大学环境与市政工程学院, 中国·河南 郑州 450000

**摘要:** 光合细菌 (PSB) 废水处理是一种环境友好、可持续的环境修复和生物资源回收技术。由于 PSB 的固有特性, 包括沉降不足、生物量损失等, 必须实施必要的控制策略。废水系统中固定化 PSB 为各种微生物在表面或内部均匀分布提供了渗透性微环境, 并成功地屏蔽了 PSB 免受外界干扰, 提高了其生物利用度, 从而有效地解决了上述突出问题。论文介绍了 PSB 中各种固定方式和高价值物质的合成; 系统阐述了 PSB 固定化应用瓶颈以及改性; 总结了近年来对 PSB 固定处理新出现污染物的尝试。为微生物固定化技术在废水处理回用中的应用提供参考。

**关键词:** 光合细菌; 固定化; 资源回收

## A Review of Immobilization, Resource Recovery, and Development Prospects of Photosynthetic Bacteria

Xiangyu Shen Zhihui Kong Haoyi Guo Wenxiao Wang

School of Environment and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou, Henan, 450000, China

**Abstract:** Photosynthetic bacteria (PSB) wastewater treatment is an environmentally friendly and sustainable technology for environmental remediation and biological resource recovery. Due to the inherent characteristics of PSB, including insufficient sedimentation, biomass loss, etc., necessary control strategies must be implemented. The immobilization of PSB in wastewater systems provides a permeable microenvironment for the uniform distribution of various microorganisms on the surface or inside, and successfully shields PSB from external interference, improving its bioavailability and effectively solving the above-mentioned prominent problems. The paper introduces various fixation methods and the synthesis of high-value substances in PSB; the system elaborates on the bottleneck and modification of PSB immobilization application; summarized recent attempts to immobilize new pollutants using PSB. Provide reference for the application of microbial immobilization technology in wastewater treatment and reuse.

**Keywords:** photosynthetic bacteria; fixation; resource recycling

### 1 背景

废水是可重复利用的资源, 但传统的废水处理技术有许多负面影响, 如高能耗、处理周期长、温室气体排放和其他不可避免的污水处理效率问题。因此, 迫切需要寻找新的替代技术来弥补这些缺陷。传统的废水处理不仅不稳定, 而且成分较高, 因此微生物废水处理技术不断发展和成熟, 其中光合细菌 (PSB) 已经有近 50 年的研究, 从 PSB 净化废水到目前热门的资源回收利用技术<sup>[1]</sup>。虽然光合细菌处理废水的规模越来越大, 但有些缺陷导致光合细菌处理废水被限制, 如光合细菌菌体较小、自然沉降困难。为了弥补这些缺陷带来的问题, 需要进行固液分离等处理工作, 由此造成处理工艺流程复杂, 增加处理成本, 严重影响了它在生产中的推广应用。因此, 光合细菌固定化方法已成为流行的废水处理技术和废水回用技术。固定化使用固定材料海藻酸盐、琼脂等进行细胞固定, 同时保护微生物细胞免受有毒污染物和

捕食的影响<sup>[2]</sup>。一些研究报告称, 微藻已被用于生产大量有价值的产品, 包括化妆品、类胡萝卜素、单细胞蛋白 (SCP) 和肥料<sup>[3]</sup>。同样, 生物燃料也是通过废物的厌氧消化获得的<sup>[4,5]</sup>。因此处理废水和从废水中生产附属产品受到了极大的关注, 这也已成为一种新的趋势<sup>[6]</sup>。在之前关于固定化 PSB 在废水处理中应用的报告中, 无论是生活废水、酚类废水、食品加工废水<sup>[7]</sup>、重金属废水<sup>[8]</sup>、纺织废水<sup>[9]</sup>还是严重污染的河水<sup>[10]</sup>, 固定化 PSB 都可以达到显著的处理效果, 并且后期的高价值物质提取和资源化利用都比游离细胞状态有更好的成效。

论文重点介绍了固定化 PSB 作为无毒废水处理和生物资源生产的一种选择的前景。对 PSB 的代谢途径、近年来的研究进展及优点进行了介绍和讨论, 综述了光合细菌生物质资源回收研究进展。基于直接相关的研究和相关领域的研究成果, 探讨了实际实施中的问题和未来的研究需求。此外,

还从经济潜在效益的角度探讨了该技术的潜力,以及未来发展的潜能和展望。

## 2 光合细菌的固定化

固定化 PSB 是通过一定的技术手段将光合细菌固定在载体上避免菌体流失、提高菌体利用率、简化处理的工艺,其优点包括处理效率高、作用时间长、不会造成二次污染、稳定性好、便于回收储存运输等。

固定化方法既可以用合成固定化技术也可以用自然固定化技术。吸附、封装、包埋是人工细胞固定的最主要方法,还有共价耦合、微生物的交联法等。包埋法和天然细胞固定中的生物膜法是两种典型的固定化技术。与凝胶包埋相比,生物膜作为自然固定技术具有光照充足、活性微生物质量优先保留、底物转化效率高等优点,被认为更适合于凝胶包埋。

包埋法是应用最广泛的聚合物辅助技术,它将细菌固定在聚合物基质的网络中。吸附法是通过一种可逆的结合机制将细菌附着在支持介质表面上的方法,吸附剂基质和细胞之间的化学作用力的类型调节了相互作用。结合的类型取决于微生物和表面的负荷。大多数细菌的表面带一个负电荷<sup>[11]</sup>。封装法是一种将细胞固定在半透膜上的方法,它允许分子通过膜转移。复合固定化技术采用上述两种或多种固定化方法的组合来固定化微生物。可根据污水的实际情况,选用性能优良、价格低廉的复合固定化载体,该固定化工艺经济合理。例如,固定化 *Shewanella xiamenensis* 聚乙烯醇/氧化石墨烯生物膜,发现组装膜有良好的生物相容性和良好的可回收性,并且氧化石墨烯可以起到电子穿梭的作用,促进微生物对铬(VI)的去除效果<sup>[12]</sup>。

## 3 固定化光合细菌的生物物质资源回收

### 3.1 回收高价值物质

世界各地的废水排放都在增加,中国仅在 2015 年就排放了 735.3 亿吨废水,如此大量的废水是 PSB 重要的潜在营养来源。传统的废水处理技术属于末端处理范围,忽略了资源回收的潜力。相比之下,废水处理和资源回收技术可以从废物中产生商业产品,受到越来越多的关注,生物物质可以作为原料在许多行业和可以产生经济价值。PSB 技术可以帮助实现碳减排的目标,从而帮助适应气候变化,据报道,PSB 在处理废水时可以产生单细胞蛋白(SCP)、聚羟基烷酸(PHA)、辅酶 Q10、5-ALA、类胡萝卜素、细菌叶绿素等<sup>[13]</sup>,具备显著的抗衰老、抑制恶性肿瘤、抗氧化以及调节血脂等效果,适用于医药保健领域。

### 3.2 光合细菌能源回收

光合细菌生物量在制氢、制沼气、制型煤、生物柴油<sup>[14]</sup>、生物聚合物等方面具有广泛的应用前景。光合细菌生物量可

以用作沼气反应器的原料,以产生甲烷。因此,一些应用已经被引入藻类生物量作为光合细菌生物量的模式<sup>[15]</sup>。

以氢气为例,由于 PSB 具有将有机废物转化为 H<sub>2</sub> 的能力,其作为生物能源生产候选物质的兴趣越来越大<sup>[16]</sup>。H<sub>2</sub> 可以从暗发酵和光发酵过程中生物地产生。但许多因素,如基质浓度、流速和光照强度都会影响这些废水的降解过程。因此,需要进一步研究以提高生物反应器的性能。细胞固定化体系在生物制氢的应用越来越多。许多种类的光合细菌能够在酶促反应中产生氢<sup>[17]</sup>。报道称,在制氢过程中,暗发酵过程中产生的挥发性脂肪酸可以被光合细菌有效地利用来制氢,混合应用促进了 H<sub>2</sub> 产量的增加(40%)。在微生物体内也可以通过卡尔文循环产生氢气<sup>[18]</sup>。因此,在未来的研究进展中固定化产氢气可能会成为主流研究方向。

## 4 固定化光合细菌资源回收和废水处理的未来发展

### 4.1 固定材料的改良和新工艺设计

由于固定化 PSB 本身的特点,如抗机械强度能力差、固定化材料与细胞的不兼容性等,需要采取相应的控制措施来克服其不足。首先,需要对固定化 PSB 污水处理厂进行新的设计。在设计过程中,先要考虑固定化材料相关方面的问题,固定化材料的多样性导致在固定的过程中会遇到各种不同的问题,所以通过材料的改良,让材料的稳定性、兼容性等都有很大的提升。比如用海藻酸包埋法固定微生物中再加入蒙脱石材料作为基质添加剂。预计未来光合细菌的研究应集中在以下三个方面:①开发从固定化光合细菌生物量中获得增值产品的新方法;②使用新的光源促进光合细菌的生长;③同时使用光合细菌和其他微生物进行废水处理,有报道称水葫芦等几种植物能够去除废水中的污染物<sup>[19,20]</sup>,同时使用光合细菌和水葫芦可以提高它们从废水中去除污染物的能力。

### 4.2 污染物的物质能量代谢调控角度

使用 KEGG 鉴定了 154 种细胞内代谢物,这些代谢物与碳和能量代谢有关,并且不同氧补充策略之间的相对丰度存在显著差异<sup>[21]</sup>。采用这种策略,生物量浓度显著增加,污染物去除效果良好。因此,在室外大型实际污水处理系统中,周期性补氧策略可能是产生 PSB 生物量和降解污染物的有效策略。虽然定期补充氧气在应用 PSB 介导的废水处理和资源回收技术方面显示出相当大的潜力,但仍有一些研究空白有待解决。我们未来应该把研究重点放在哪一种代谢机制会适应这种策略的应用,PSB 如何快速适应新环境的变化,未来在物质能量代谢调控中达到怎么样的一种平衡才能加快污染物的去除效率。

### 4.3 固定化 PSB 处理新兴污染物的潜力

目前,固定化技术在去除重金属废水方面取得了显著的效果<sup>[22]</sup>。基于 PSB 去除各种重金属的可行性已被证明,并且考虑到固定化材料在降低 PSB 毒性方面的作用,固定化 PSB 可能具有去除重金属的潜力。材料和微生物的物理吸附、化学吸附和微生物还原的协同作用是去除重金属颗粒的重要作用机制,吸附还原协同作用对固定化体系中吸附后的重金属的处理和回收高效方便,已成为当今研究的热点。此外,微塑料和抗生素等更特殊的新兴污染物在生态环境中的迁移转化,以及后来的生物降解,现在更受到各界的关注<sup>[23]</sup>。材料和微生物对微塑料和抗生素具有显著的处理作用,微塑料与抗生素污染物之间存在相互吸附原理<sup>[24]</sup>。如果形成一个共同的固定化体系,利用 PSB 和材料去除微塑料和抗生素,固定化 PSB 的再利用和去除性能将节省大量的能源和经济。这种固定系统将是去除微塑料和抗生素的重大突破。

## 5 结论

PSB 已经在农业和医疗保健行业证明了其重要作用。PSB 生物质提取可以当作动物饲料,我们现在可以扩大 PSB 技术的范围,慢慢拓展到工业层面,并且开展深层次处理废水研究,固定化 PSB 处理各种类型废水就是很好的方向。固定化 PSB 废水处理和增值物质回收技术可以降解宏观污染物、总氮、重金属等,同时产生高价值产品。叙述了固定化 PSB 技术的改良以及对处理新兴污染物的潜力。技术经济分析表明,PSB 具有良好的应用前景,但在安全性评价、稳定运行、分离纯化方法、放大设计等方面亟待进一步研究。PSB 技术应该在循环经济中发挥作用。

### 参考文献:

- [1] 张光明,孟帆,曹可凡,等.光合细菌污水资源化研究进展[J].工业水处理,2020,40(3):1-6.
- [2] Kube M, Fan L, Roddick F. Alginate-immobilised algal wastewater treatment enhanced by species selection[J]. Algal Research-Biomass Biofuels and Bioproducts, Amsterdam: Elsevier,2021(54):102219.
- [3] Lim J H K, Gan Y Y, Ong H C, et al. Utilization of microalgae for bio-jet fuel production in the aviation sector: Challenges and perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021(149):111396.
- [4] Deng C, Lin R, Kang X, et al. Improving gaseous biofuel yield from seaweed through a cascading circular bioenergy system integrating anaerobic digestion and pyrolysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2020(128):109895.
- [5] Tawfik A, Ali M, Danial A, et al. 2-biofuels (H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) production from anaerobic digestion of biscuits wastewater: Experimental study and techno-economic analysis[J]. Journal of Water Process Engineering,2021(39):101736.
- [6] Puyol D, Batstone D J, Hülsen T, et al. Resource Recovery from Wastewater by Biological Technologies: Opportunities, Challenges, and Prospects[J]. Frontiers in Microbiology,2017(7).
- [7] Hu X. Application of alginate immobilized microalgae in treating real food industrial wastewater and design of annular photobioreactor: A proof-of-concept study[J]. Algal Research,2021(7).
- [8] Jiang Y, Yang F, Dai M, et al. Application of microbial immobilization technology for remediation of Cr(VI) contamination: A review[J]. Chemosphere,2022(286):131721.
- [9] Cheng J, Wu X, Jin B, et al. Coupling of Immobilized Photosynthetic Bacteria with a Graphene Oxides/PSF Composite Membrane for Textile Wastewater Treatment: Biodegradation Performance and Membrane Anti-Fouling Behavior[J]. Membranes,2021,11(3):226.
- [10] Peng M, Xu H, Yang G, et al. Purifying Heavily Polluted River Water Using Immobilized Native Photosynthetic Bacteria[J]. Journal of Environmental Engineering, Reston: Asce-Amer Soc Civil Engineers,2021,147(8):04021021.
- [11] Sagir E, Alipour S. Photofermentative hydrogen production by immobilized photosynthetic bacteria: Current perspectives and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021(141):110796.
- [12] Luo Q, Chen Z, Li Y, et al. Highly Efficient and Recyclable *Shewanella xiamenensis*-Grafted Graphene Oxide/Poly(vinyl alcohol) Biofilm Catalysts for Increased Cr(VI) Reduction[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, American Chemical Society,2019,7(14):12611-12620.
- [13] 王翠翠,卢海凤,张光明,等.近红外光对光合细菌利用废水累积高价值产物的影响[J].工业水处理,2023:1-21.
- [14] Fu X, Qiao Y, Xue J, et al. Analyses of community structure and role of immobilized bacteria system in the bioremediation process of diesel pollution seawater[J]. Science of The Total Environment,2021(799):149439.
- [15] Zhao W, Zhang G. Optimization of photosynthetic bacteria wastewater treatment and study of microbial species diversity[J]. Desalination and Water Treatment, Hopkinton: Desalination Publ,2014,52(28-30):5357-5365.
- [16] 姜淑敏,汪吉霞,王悦佳,等.光合细菌产氢研究进展[J].现代农业科技,2023(19):136-142.
- [17] Chandra R, Mohan S V. Enhanced bio-hydrogenesis by co-culturing

- photosynthetic bacteria with acidogenic process: Augmented dark-photo fermentative hybrid system to regulate volatile fatty acid inhibition[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, Oxford: Pergamon-Elsevier Science Ltd,2014,39(14):7604-7615.
- [18] McKinlay J B, Harwood C S. Photobiological production of hydrogen gas as a biofuel[J]. *Current Opinion in Biotechnology*,2010,21(3):244-251.
- [19] Narayanan S, Gowthami M. Cyanide degradation by consortium of bacterial species isolated from Sago industry effluent[J]. *Journal of Environmental Treatment Techniques*,2015(3):41-46.
- [20] Rezanian S, Din M F M, Taib S M, et al. The efficient role of aquatic plant (water hyacinth) in treating domestic wastewater in continuous system[J]. *International Journal of Phytoremediation*, Philadelphia: Taylor and Francis Inc,2016,18(7):679-685.
- [21] Lu H, He S, Zhang G, et al. Periodic oxygen supplementation drives efficient metabolism for enhancing valuable bioresource production in photosynthetic bacteria wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, Oxford: Elsevier Sci Ltd,2022(347):126678.
- [22] Wang C, Wang J, He X, et al. Effective removal of Mn(II) from acidic wastewater using a novel acid tolerant fungi *Aspergillus* sp. MF1 via immobilization[J]. *Journal of Hazardous Materials Advances*,2023(10):100301.
- [23] Behera S, Das S. Environmental impacts of microplastic and role of plastisphere microbes in the biodegradation and upcycling of microplastic[J]. *Chemosphere*,2023(334):138928.
- [24] Zhuang S, Wang J. Interaction between antibiotics and microplastics: Recent advances and perspective[J]. *Science of The Total Environment*,2023(897):165414.