

藻菌共生系统互作机制与应用研究进展

陶 然

眉山药科职业学院基础医学部, 四川 眉山

收稿日期: 2026年3月12日; 录用日期: 2026年4月13日; 发布日期: 2026年4月29日

摘 要

藻菌共生系统(ABSS)作为一种环境友好型生物技术, 在废水处理和资源回收领域展现出巨大潜力。本文系统回顾了近年来ABSS领域的研究进展, 重点探讨了藻菌共生系统中复杂的互作机制及其在污染物去除中的应用效果。在工程应用方面, 相关研究开发了多种反应器配置, 包括悬浮生长系统、附着生长系统和藻菌颗粒污泥系统, 每种系统在污染物去除效率和操作特性上各具特色。同时, 还详细分析了ABSS对传统污染物和新兴污染物的去除机理与效能。最后, 针对当前ABSS在规模化应用中面临的技术挑战, 提出了未来研究的方向。本文旨在为ABSS的进一步研究和工程应用提供理论参考。

关键词

藻菌共生系统, 互作机制, 废水处理

Advances in Interaction Mechanisms and Applications in Algal-Bacterial Symbiotic Systems

Ran Tao

Department of Basic Medical Sciences, Meishan Pharmaceutical College, Meishan Sichuan

Received: March 12, 2026; accepted: April 12, 2026; published: April 29, 2026

Abstract

Algal-bacterial symbiotic systems (ABSS) represent an environmentally friendly biotechnology demonstrating significant potential in wastewater treatment and resource recovery. This paper systematically reviews recent research advances in the ABSS field, focusing on the complex interaction mechanisms within algal-bacterial symbiotic systems and their application effectiveness in pollutant removal. Regarding engineering applications, various reactor configurations have been developed, including suspended growth systems, attached growth systems, and algal-bacterial granular

sludge systems, each exhibiting distinct characteristics in pollutant removal efficiency and operational properties. Additionally, the removal mechanisms and efficacy of ABSS for both conventional and emerging pollutants are analyzed in detail. Finally, technical challenges facing the large-scale application of ABSS are summarized, and future research directions are proposed. This paper aims to provide theoretical guidance for further research and engineering applications of ABSS.

Keywords

Algal-Bacterial Symbiotic Systems, Interaction Mechanism, Wastewater Treatment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球水资源短缺和水环境污染问题日益严重, 开发高效、低耗能、可持续的废水处理技术迫在眉睫。传统活性污泥法虽然被广泛应用, 但其具有高能耗、高碳排放以及对抗生素等新兴污染物去除能力有限等缺点[1]。在这一背景下, 藻菌共生系统(ABSS)因其独特的优势引起了广泛关注。ABSS 模仿自然生态系统中微生物的协同共生关系, 即微藻的光合作用为细菌提供氧气, 同时细菌降解有机污染物为藻类提供碳源和矿物质营养, 以此为基础的共生关系形成了高效的营养物质循环和能量流动系统。这种自然的共生关系不仅能减少对外部能源的依赖, 还能提高污染物去除效率[2]。从技术发展历程来看, ABSS 的研究经历了从自然观察到实验室模拟, 再到工程化应用的逐步深入过程。早期研究主要关注藻类和细菌在自然环境中的共生现象, 后来逐渐转向构建人工藻菌系统用于废水处理。近年来, 随着对藻菌互作机制认识的深化和反应器设计技术的进步, ABSS 的应用范围不断扩大, 处理对象也从传统的市政污水扩展到含重金属工业废水和含抗生素的医疗废水等更复杂的废水类型。

本文旨在对 ABSS 的最新研究进展进行整理, 并重点分析藻菌共生作用机制, 总结现下主要反应器的设计特点和运行性能, 并展望未来发展方向。通过综合性的文献综述, 期望为相关领域的研究提供有价值的基础理论参考, 推动 ABSS 技术的进一步发展和实际应用。

2. 藻菌互作机制

藻菌共生系统的核心在于藻类和细菌之间复杂而紧密的相互作用。这些相互作用发生在多个层面, 从简单的物质交换到复杂的信号传导和水平基因转移, 是构建高效协同的微生物系统的基础(如图 1)。深入理解这些互作机制对于优化藻菌共生系统设计、提高污染物处理效率和增强系统稳定性具有重要意义。

2.1. 营养交换机制

营养交换是藻菌互作机制最基本的形式, 也是维持共生关系的基础。藻类和细菌通过交换氧气、二氧化碳和各种溶解性代谢产物, 实现资源的互补利用和高效循环。在气体交换方面, 藻类通过光合作用产生氧气, 为细菌的好氧代谢提供电子受体。研究显示, 在适宜光照条件下, 藻类的产氧速率能够满足污水处理过程中大部分耗氧需求[3]。这使得 ABSS 系统能显著降低机械曝气需求, 从而降低能耗, 节约资源。同时, 细菌在呼吸作用和有机物降解过程中释放的二氧化碳为藻类光合作用提供了碳源, 形成有效的碳循环。这种基于氧气和二氧化碳的气体交换不仅提高了资源利用效率, 还在藻菌系统内部创造了有利于污染物降解的氧化还原梯度。

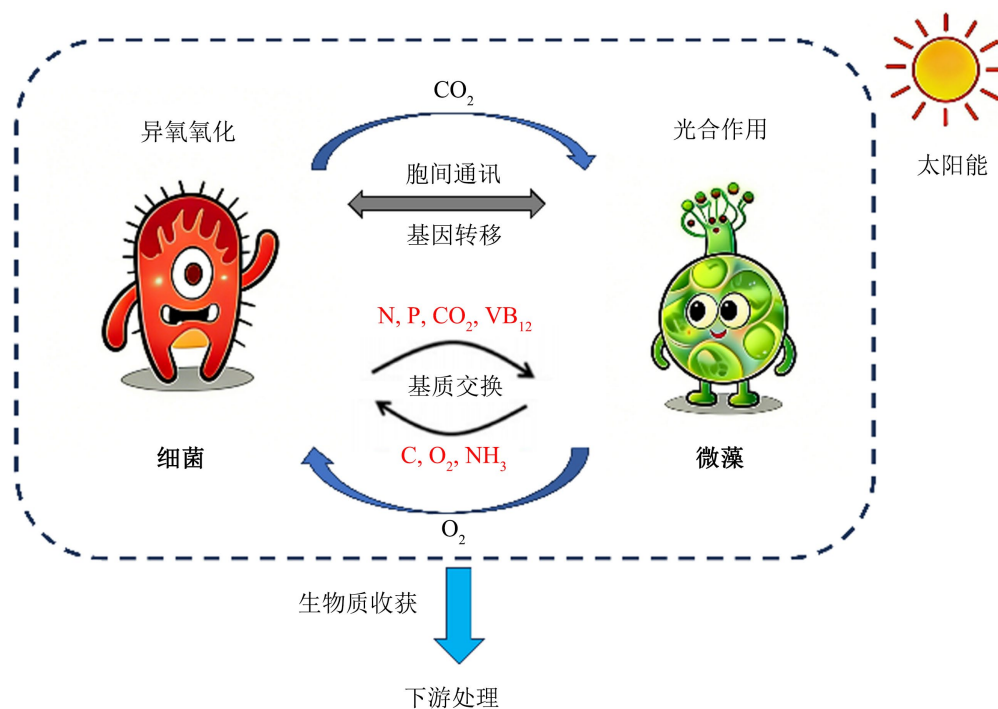


Figure 1. Algae-bacteria symbiotic mechanism
图 1. 藻菌共生机制

除了气体交换，溶解性代谢产物的交换也发挥着重要作用。细菌能够合成藻类生长所必需的维生素和生长因子，如维生素 B_{12} [4]。许多微藻自身无法合成维生素 B_{12} ，所以必须依赖外界环境供给。某些细菌能够合成维生素 B_{12} ，提供给依赖维生素 B_{12} 的藻类，促进其生长和代谢。此外，细菌分泌的植物激素如吲哚乙酸(IAA)也能显著促进藻类生长。同时，藻类分泌的光合产物如有机酸、糖类和氨基酸可为异养细菌提供了易降解的碳源和能源[5]。这种代谢产物的相互供给建立了紧密的营养联系，增强了系统的稳定性和抗冲击能力。这种多层次的营养交换机制使藻菌共生系统能够高效利用资源，适应多变的生长环境。

2.2. 信号传导机制

信号传导是藻菌之间进行信息交流和协调群体行为的重要方式，主要有群体感应和化感作用两种机制。这些信号分子浓度很低，但对微生物行为有着至关重要的调控作用。

群体感应是细菌中广泛存在的一种细胞间通讯机制，细菌通过分泌和感知特定的信号分子来协调群体行为。在 ABSS 中，群体感应对微生物聚集、生物膜形成和胞外聚合物分泌等过程起着关键调控作用。主要信号分子包括 N-酰基高丝氨酸内酯(AHLs)、自诱导肽(AIPs)和自诱导剂-2(AI-2)。其中，AHLs 是革兰氏阴性菌中最常见的信号分子，在藻菌互作中研究最为深入[6]。研究表明，外源性添加特定的 AHLs 信号分子能够显著促进藻菌共生颗粒污泥的形成和稳定。这些信号分子通过激活相关基因表达，调控胞外聚合物合成酶的活性，从而影响微生物的聚集行为[7]。此外，群体感应信号还参与调控藻类和细菌的代谢活动，影响污染物的降解效率。

化感作用是另一种重要的信号传导机制，指一种生物通过释放化学物质影响其他生物生长和代谢的现象。在 ABSS 中，藻类和细菌都可能产生化感物质，对共生伙伴或竞争者产生影响。一些藻类能够产生多酚类、萜类和脂肪酸类化合物，抑制某些细菌的生长[8]。例如，普通小球藻产生的胞外多糖被证明

对金黄色葡萄球菌等病原菌有抑制作用。这种抑制作用有助于维持系统的微生物平衡，防止某些菌群过度繁殖。相反，某些细菌产生的化合物还可能促进藻类生长，如前面提到的 IAA。此外，在营养限制条件下，微生物可能释放抑制性物质限制竞争者的生长，从而维持生态位的分化。

2.3. 基因转移机制

基因水平转移是微生物进化的重要驱动力，也是藻菌共生系统中功能基因交流的重要途径。通过基因水平转移，微生物能够在短时间内获得新的代谢能力，快速适应环境变化。在 ABSS 中，基因转移主要发生在细菌之间，以及从细菌到藻类的方向。在密集的藻菌共生系统中，微生物细胞距离近、接触频繁，基因水平转移提供了有利条件。从细菌转移到硅藻的编码铁蛋白提取的基因中可以发现类似的情况。通过获取该基因，硅藻可以摄取铁载体结合的铁，有利于其适应铁限制的生长环境[9]。

基因水平转移不仅影响单个物种的特性，还可能改变整个微生物群落的功能和稳定性。通过获得新的代谢途径，微生物能够利用新的底物，拓展生态位。然而，基因水平转移也可能导致有害基因的传播，对微生物生长环境构成潜在风险。因此，深入理解 ABSS 中基因水平转移机制，对评估藻菌共生系统的安全性和稳定性至关重要。

藻菌互作的这三个层面——营养交换、信号传导和基因转移——并非孤立存在，而是相互关联、相互影响。营养交换为信号分子和遗传物质的传递提供了介质和环境；信号传导调控营养物质的产生和利用；基因转移则可能改变微生物的营养需求和信号传导。这种多层次、网络化的互作关系赋予了 ABSS 高度的复杂性和适应性，使其能够在多变的环境中保持稳定高效的功能。

3. 藻菌共生系统的技术发展与应用

3.1. ABSS 不同反应体系

随着对藻菌互作机制认识的不断深入，多种 ABSS 技术配置被开发出来，从简单的开放式池塘到复杂的封闭式反应器，再到近年来兴起的藻菌颗粒污泥系统。这些技术各具特点，适用于不同的处理场景和目标。根据微生物的存在状态。

ABSS 反应器可分为悬浮生长系统和附着生长系统两大类，不同反应器的优缺点各有不同(见表 1)。悬浮生长系统主要包括开放式藻塘和封闭式光生物反应器。自然环境中存在大量的细菌或真菌，它们可能与微藻形成天然的共生关系，藻菌共生系统的概念于 1981 年被首次提出，主要用于研究氮的吸收，此概念为开放式藻塘的生态学基础。开放式藻塘是最早应用的藻类培养系统，通常为浅池结构(水深约为 20 cm~50 cm)，依靠自然光照和大气交换。主要优点是结构简单、建设成本低、易于操作，特别适合处理大量低浓度废水。但也存在明显缺点：占地面积大、受气候条件影响显著、水分蒸发率高、易受外来物种污染等。封闭式光生物反应器是为了克服开放式藻塘的缺点而发展起来的，具有更高的光利用效率且占地面积小。Su Yanyan 等[10]将污水中分离得到藻菌体接种到光生物反应器中，以去除城市污水中的污染物。实验结果表明，COD 和磷酸盐在 8 天内的平均去除率分别达到了 $98.2\% \pm 1.3\%$ 、 $64.8\% \pm 1.0\%$ 。封闭式光生物反应器能够提供更可控的环境条件，提高生物质产率和污染物去除效率，但其建设和运行成本较高。附着生长系统通过将微生物固定在载体表面，提高了生物质浓度和系统稳定性。常见的附着生长系统有藻菌生物膜反应器。在生物膜反应器中，微生物附着在填料表面形成生物膜，废水通过生物膜时污染物被降解。这种系统具有较高的生物质滞留能力、较短的水力停留时间和较高的抗冲击负荷能力[11]。Fierro 等[12]将栅藻固定于壳聚糖上用于处理污水。在 12 h 内，该生物膜反应器 N 和 P 去除率分别达到了 70%和 94%。载体材料的使用可能会使微藻的光能捕获受限，此外载体材料的高生产成本也限制着其大规模的使用。

Table 1. Advantages and disadvantages of various algal-bacterial reactors**表 1.** 各类藻菌反应器的优缺点

反应器类型	优点	缺点
开放式藻塘	构建成本低	占地面积大、体系不稳定
封闭式光反应器	可控性强、生物质产量高	运行成本高
藻菌生物膜反应器	水力停留时间短、生物质易分离	易出现膜污染、启动周期长
藻菌颗粒污泥体系	沉降性好、污染物处理效率高	长期稳定性还需优化

藻菌颗粒污泥体系是近年来发展起来的一种新型 ABSS 形式。该系统通过藻类和细菌的自聚集形成致密颗粒,具有良好的沉降性能和较高的生物质收获速率。藻菌颗粒污泥体系的形成是一个复杂的过程,涉及胞外聚合物分泌、细胞间相互作用和环境选择压力等多个因素。该系统通常采用序批式反应器,具有占地面积小、污泥产量低、能耗低等优点。藻-菌颗粒污泥能在短时间内稳定构建,且其污染物去除效果优于单一细菌体系的好氧颗粒污泥,对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的平均去除率可达到 98%、97%、77%和 93%以上[13]。藻菌颗粒污泥体系中易沉降的藻菌生物质还可被进一步用做可再生能源的材料,符合环境可持续理念[13]。

3.2. 污染物去除性能与机制

ABSS 能够有效去除多种污染物,包括传统的营养盐(氮、磷)和新兴污染物(抗生素、重金属等)。不同种类的藻菌共生系统处理废水的机制主要涉及营养物质交换和信号传导,不同环境因素对藻菌间的互作机制也可能有影响,相关研究较少,需要深入探讨。

对于氮的去除,ABSS 主要通过微生物同化、硝化-反硝化和挥发等途径实现。ABSS 的一个独特优势是能够通过藻类光合作用创造昼夜交替的氧化还原环境:白天藻类产氧创造好氧条件,促进硝化作用;夜晚藻类停止产氧,藻菌系统转为缺氧状态,促进反硝化。这种自然交替减少了对外部曝气的依赖,提高了脱氮效率。磷的去除主要通过微生物同化、化学沉淀和吸附等过程。藻类和聚磷菌都能吸收磷酸盐并将其储存在细胞内,大量研究显示,ABSS 对氮和磷的去除通常高于传统活性污泥法。

抗生素是近年来备受关注的新兴污染物,传统污水处理工艺对其去除效果有限。ABSS 通过多种机制协同去除抗生素,包括生物吸附、生物积累和生物降解。藻类和细菌产生的胞外聚合物含有丰富的官能团,能够通过静电作用、疏水作用和氢键等吸附抗生素分子,而藻菌共生使抗生素的降解效率增强,效果显著高于单一藻类或细菌系统[14]。

重金属去除主要依赖生物吸附和细胞内积累。藻细胞体积小且表面通常带负电荷,能够通过静电吸引吸附阳离子型重金属。微藻和细菌都能产生胞外聚合物,胞外聚合物中的多糖、蛋白质等含有大量配位基团,能够与重金属离子形成稳定的配合物。此外,微生物还能通过氧化还原反应改变重金属的价态,影响其迁移性和毒性。ABSS 对多种重金属(如 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn)都有较好的去除效果,去除率通常可达 60%~90% [15]。ABSS 不仅能够有效去除污染物,还能产生有价值的生物质,实现废水处理和生物质资源化利用。藻菌生物质中富含蛋白质、碳水化合物、脂类和多种高价值物质,可用于生产生物能源、动物饲料、肥料和化学品。藻菌生物质可通过厌氧消化产生沼气,其甲烷产率通常高于单独的藻类或活性污泥。一些富含脂类的微藻(如小球藻、栅藻)可直接提取油脂生产生物柴油。此外,藻菌生物质还可通过热化学转化(如热解、气化)生产生物油,或通过发酵生产生物氢和生物乙醇。藻菌生物质也是优质的动物饲料和肥料。藻类富含蛋白质(占 40%~60%的干重)、必需氨基酸、维生素和色素,可作为鱼、虾和家禽的饲料添加剂,提高动物生长性能和产品品质[16]。生物质资源化利用是提高 ABSS 经济性和可持续性

的关键。然而，目前生物质收获和加工成本仍然较高，限制了其大规模应用。开发低成本高效的收获技术，优化生物质转化工艺，以及开发高价值产品市场，是未来研究的重要方向。

4. 挑战与未来展望

尽管 ABSS 在废水处理和资源回收方面展现出巨大潜力，但将其从实验室研究推向大规模工程应用仍面临诸多挑战。这些挑战涉及基础科学、工程技术、经济可行性和政策支持等多个方面。未来研究需要在这些领域取得突破，才能实现 ABSS 的广泛应用。当前 ABSS 的稳定性是其应用于户外的主要挑战之一。ABSS 的性能受环境因素(温度、光照、降雨)影响很大，季节性变化和天气波动可能导致其废水处理效率不稳定。开发低成本、低能耗、环境友好的收获技术是 ABSS 商业化的关键。未来，利用微生物自絮凝可能是有效的改进方法。这需要全面评估 ABSS 的使用周期成本和环境效益，通过技术创新降低成本，通过政策支持创造市场，提高经济可行性。

5. 结论

ABSS 作为一种模仿自然生态互惠关系的生物技术，在废水处理和资源回收领域展现出独特优势。通过藻类和细菌的协同作用，ABSS 能够高效去除污染物，同时回收资源，降低能耗和碳排放，符合可持续发展的理念。本文系统综述了 ABSS 的研究进展，从藻菌互作机制、技术发展和未来挑战，提供了全面的视角。藻菌互作包括营养交换、信号传导和基因转移三个层面，这些微观机制共同决定了系统的宏观功能。营养交换实现物质循环和能量流动；信号传导协调群体行为；基因转移促进适应和进化。深入理解这些机制对于优化 ABSS 设计和运行至关重要。在技术发展方面，研究者开发了多种 ABSS 配置，从开放式池塘到封闭式反应器，再到藻菌颗粒污泥系统，不断克服技术限制，提高处理效率。然而，ABSS 的大规模应用仍面临挑战，包括系统稳定性、生物质收获困难、对新兴污染物的风险认识不足以及经济可行性等多种问题。此外当 ABSS 投入到更大规模的实际应用时，光照、温度等环境因素会对 ABSS 的稳定性有很大影响，如何在多变、不可控的自然条件下实现 ABSS 的稳定运行也是亟需解决的问题。ABSS 能高效、稳定去除污染物，目前是废水处理和资源化利用新技术的热点方向，未来的研究需要在基础科学、工程技术等多个方向深入探索，研究重点方向可以聚焦于提高 ABSS 的稳定性及降低其应用成本，从而推动 ABSS 从实验室走向工程实践。

参考文献

- [1] Siddharth, T., Sridhar, P., Vinila, V. and Tyagi, R.D. (2021) Environmental Applications of Microbial Extracellular Polymeric Substance (EPS): A Review. *Journal of Environmental Management*, **287**, Article ID: 112307. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112307>
- [2] Ramanan, R., Kim, B., Cho, D., Oh, H. and Kim, H. (2016) Algae-Bacteria Interactions: Evolution, Ecology and Emerging Applications. *Biotechnology Advances*, **34**, 14-29. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.003>
- [3] Cuevas-Castillo, G.A., Navarro-Pineda, F.S., Baz Rodríguez, S.A. and Sacramento Rivero, J.C. (2020) Advances on the Processing of Microalgal Biomass for Energy-Driven Biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **125**, Article ID: 109606. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109606>
- [4] Zhang, B., Li, W., Guo, Y., Zhang, Z., Shi, W., Cui, F., et al. (2020) Microalgal-Bacterial Consortia: From Interspecies Interactions to Biotechnological Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **118**, Article ID: 109563. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109563>
- [5] Leng, L., Li, W., Chen, J., Leng, S., Chen, J., Wei, L., et al. (2021) Co-Culture of Fungi-Microalgae Consortium for Wastewater Treatment: A Review. *Bioresource Technology*, **330**, Article ID: 125008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125008>
- [6] 张冰. 菌藻共生好氧颗粒污泥的形成机理及基于 QS 的强化机制[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [7] Wang, H., Wu, P., Zheng, D., Deng, L. and Wang, W. (2022) *n*-Acyl-Homoserine Lactone (AHL)-Mediated Microalgal-

- Bacterial Communication Driving *Chlorella*-Activated Sludge Bacterial Biofloc Formation. *Environmental Science & Technology*, **56**, 12645-12655. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00905>
- [8] Oruganti, R.K., Katam, K., Show, P.L., Gadhamshetty, V., Upadhyayula, V.K.K. and Bhattacharyya, D. (2022) A Comprehensive Review on the Use of Algal-Bacterial Systems for Wastewater Treatment with Emphasis on Nutrient and Micropollutant Removal. *Bioengineered*, **13**, 10412-10453. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2056823>
- [9] Zhang, S., Cao, J., Zheng, Y., Hou, M., Song, L., Na, J., *et al.* (2024) Insight into Coagulation/flocculation Mechanisms on Microalgae Harvesting by Ferric Chloride and Polyacrylamide in Different Growth Phases. *Bioresource Technology*, **393**, Article ID: 130082. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130082>
- [10] Su, Y., Mennerich, A. and Urban, B. (2011) Municipal Wastewater Treatment and Biomass Accumulation with a Wastewater-Born and Settleable Algal-Bacterial Culture. *Water Research*, **45**, 3351-3358. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.046>
- [11] 胡馨月, 车兴凯, 汪鲁, 李永富. 用于污水处理的藻菌共生系统研究进展及展望[J]. 水生态学杂志, 2025, 46(4): 70-84.
- [12] Fierro, S., del Pilar Sánchez-Saavedra, M. and Copalucía, C. (2008) Nitrate and Phosphate Removal by Chitosan Immobilized *Scenedesmus*. *Bioresource Technology*, **99**, 1274-1279. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.043>
- [13] 肖亚兵, 张雪纯, 季斌, 等. 微藻生物强化对藻-菌颗粒污泥的形成影响及污染物去除研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 761-767.
- [14] Hu, L., Ye, Y., Li, Y., Tan, X., Liu, X., Zhang, T., *et al.* (2025) Bacteria-Algae Synergy in Carbon Sequestration: Molecular Mechanisms, Ecological Dynamics, and Biotechnological Innovations. *Biotechnology Advances*, **83**, Article ID: 108655. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108655>
- [15] Zhang, B., Wu, L., Shi, W., Zhang, Z. and Lens, P.N.L. (2022) A Novel Strategy for Rapid Development of a Self-Sustaining Symbiotic Algal-Bacterial Granular Sludge: Applying Algal-Mycelial Pellets as Nuclei. *Water Research*, **214**, Article ID: 118210. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118210>
- [16] Patidar, S.K. (2025) Metabolic Interactions between Microalgae and Bacteria: Multifunctional Ecological Interplay and Environmental Applications. *Algal Research*, **86**, Article ID: 103904. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.103904>