Advances in Environmental Protection 环境保护前沿, 2026, 16(11), 1705-1713
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/aep
https://doi.org/10.12677/aep.2026.1611171

Hans汉斯

微藻在废水处理中的研究进展

高凌雪，汤占越，黄　星，查世娇*

安徽理工大学地球与环境学院，安徽　淮南

收稿日期：2026年10月12日；录用日期：2026年11月10日；发布日期：2026年11月17日

摘　要

针对传统废水处理工艺能耗较高、资源回收不足等问题，微藻凭借光合固碳、营养盐同化及生物质可利用等特性，成为废水处理与资源回收领域的研究对象。本文围绕微藻处理废水的主要作用机制，梳理稳定塘与高效藻塘、光生物反应器、膜光生物反应器及菌藻共生生物膜等技术的基本原理和应用特点，并总结其在生活污水、工业废水和养殖废水处理中的研究进展。在此基础上，分析藻种适应性、微藻收获、系统运行稳定性及生物质利用等方面的制约因素，提出藻种筛选与驯化、反应器优化和资源化路径拓展等研究方向，以期为相关技术的进一步研究与工程应用提供参考。

关键词

微藻，废水处理，菌藻共生，生物修复，资源回收

Research Progress on Microalgae in Wastewater Treatment

Lingxue Gao, Zhanyue Tang, Xing Huang, Shijiao Zha*

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: October 12, 2026; accepted: November 10, 2026; published: November 17, 2026

Abstract

Addressing issues such as high energy consumption and inadequate resource recovery associated with traditional wastewater treatment processes, microalgae have emerged as a focal point of research in the field of wastewater treatment and resource recovery due to their capabilities for photosynthetic carbon fixation, nutrient assimilation, and biomass utilization. This paper reviews the primary mechanisms by which microalgae treat wastewater, outlines the fundamental principles and operational characteristics of technologies—including stabilization ponds, high-rate algal

*通讯作者。

文章引用: 高凌雪, 汤占越, 黄星, 查世娇. 微藻在废水处理中的研究进展[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(11): 1705-1713. DOI: 10.12677/aep.2026.1611171

ponds, photobioreactors, membrane photobioreactors, and bacteria-algae symbiotic biofilms—and summarizes research progress regarding their application in treating domestic sewage, industrial wastewater, and aquaculture wastewater. Furthermore, the paper analyzes constraints related to algal strain adaptability, microalgal harvesting, system operational stability, and biomass utilization. It proposes future research directions—such as strain screening and acclimation, reactor optimization, and the expansion of resource recovery pathways—aiming to provide a reference for further research and engineering applications in this field.

Keywords

Microalgae, Wastewater Treatment, Bacteria-Algae Symbiosis, Bioremediation, Resource Recovery

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

水资源短缺与水环境污染已成为制约可持续发展的重要问题[1]。随着工业化和城镇化持续推进，生活、工业及农业生产活动产生的废水中常含有氮、磷、有机物、重金属及新兴污染物，若处理不充分，可能对受纳水体及生态系统造成不利影响。活性污泥法等传统工艺应用成熟，但在运行过程中仍存在曝气能耗、剩余污泥处置及资源回收效率等方面的压力[2]。在碳减排与循环经济理念的推动下，探索兼顾污染控制和资源回收的废水处理技术，已成为环境工程领域的重要研究方向[3]。

微藻是一类能够进行光合作用的微型生物，广泛分布于淡水、海水及其他水环境中，具有生长较快、培养方式灵活等特点。与高等植物相比，部分微藻具有较高的单位面积生物质生产潜力，并可吸收废水中的氮、磷等营养盐用于细胞生长；与此同时，微藻通过光合作用固定无机碳，为污染物去除与碳资源利用的协同提供了可能[4] [5]。自 20 世纪中期以来，微藻逐步应用于废水处理，相关系统由早期的稳定塘发展出高效藻塘及多种封闭式反应器，处理对象也逐渐拓展至生活污水、部分工业废水和养殖废水等[6] [7]。

近年来，随着对微藻生理生化特性认识的深入和生物工程技术的进步，微藻废水处理技术取得了显著进展[8]。研究表明，微藻不仅可以高效去除氮、磷等常规污染物，还能通过生物吸附、生物降解和光催化氧化等途径去除重金属和抗生素等新兴污染物[9]。更重要的是，处理过程中产生的微藻生物质可以进一步转化为生物柴油、生物肥料、饲料等高附加值产品，实现“以废治废、变废为宝”的良性循环[6] [10]。本文从微藻处理废水的作用机理、主要技术类型、不同废水类型的应用以及面临的挑战与发展趋势等方面，系统综述了近年来的研究进展，以期为该技术的进一步发展和工程化应用提供参考。

2. 微藻处理废水的作用机理

2.1. 营养盐去除机理

微藻对废水中氮、磷等营养盐的去除，主要涉及细胞同化吸收，以及由藻类活动引起的生化或化学转化。在光照条件下，微藻利用无机碳进行光合作用，并吸收氮、磷合成蛋白质、核酸和磷脂等细胞组分[11]。废水中的氮通常以氨氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)及有机氮等形式存在。多数微藻能够直接吸收

氨氮，并经谷氨酰胺合成酶－谷氨酸合成酶(GS-GOGAT)等途径将其同化为细胞有机氮；在适宜条件下，也可吸收硝态氮，经硝酸还原酶和亚硝酸还原酶逐步还原后参与代谢[12]。在菌藻共生系统中，细菌的硝化、反硝化作用与微藻的同化吸收可能共同影响氮的迁移转化，实际贡献取决于溶解氧、碳源、光照及系统运行条件。

磷的去除主要依赖微藻吸收同化，以及特定水化学条件下发生的沉淀过程。被微藻吸收的磷可用于合成ATP、核酸和膜磷脂等细胞组分。微藻光合作用消耗无机碳可能导致水体 pH 升高，进而改变磷酸盐的存在形态；当 pH 及钙、镁等离子浓度达到适宜条件时，部分磷可能通过沉淀作用从水相中去除[13]。因此，系统总磷去除并非完全等同于微藻细胞吸收，其贡献还受到水质组成、pH 变化及固液分离效果等因素影响。

2.2. 重金属去除机理

微藻对重金属的去除通常可分为细胞表面生物吸附和细胞内生物富集。生物吸附主要由细胞表面与金属离子之间的物理化学作用驱动，响应相对较快。微藻细胞表面的多糖、蛋白质等组分含有羧基、羟基、氨基等官能团，可通过离子交换、络合等作用与部分金属离子结合[14]。生物富集则涉及金属离子跨越细胞膜并在细胞内积累，通常与细胞代谢状态及金属形态有关。部分微藻可通过金属结合蛋白或植物螯合肽等参与金属解毒与耐受，但具体机制会因藻种、金属种类和暴露条件而异[14]。

不同微藻的重金属去除能力受细胞表面性质、生长状态、金属形态及水体条件等因素影响。已有研究关注小球藻(*Chlorella vulgaris*)、栅藻(*Scenedesmus spp.*)等藻类对镉、铅、铜、锌等金属的吸附或富集潜力。部分预处理方法能够改变生物质表面官能团及可接触位点，从而影响其吸附性能；相关效果仍需结合具体材料、金属种类和实验条件进行比较[15]。因此，在评价微藻重金属处理效果时，应区分活藻的吸收富集与非活性生物质的吸附作用，并关注富集生物质的后续安全处置。

2.3. 新兴污染物去除机理

抗生素、内分泌干扰物及微塑料等新兴污染物具有来源复杂、环境行为多样等特点，其在微藻系统中的去除过程也并不单一。首先，污染物可能通过疏水作用、静电作用或氢键等与细胞表面结合；例如，环丙沙星等抗生素类药物可以通过静电作用吸附在带负电的微藻细胞表面[16]。其次，某些藻类及其伴生微生物可能参与污染物的生物转化，但转化程度与污染物结构、藻株特性和培养条件密切相关。再次，微藻在光合作用过程中产生的活性氧物种(ROS)，如羟基自由基、超氧阴离子等，可以氧化分解水中的新兴污染物。这种光催化氧化作用在菌藻共生系统中尤为显著[17]。需要注意的是，污染物从水相中消失并不必然意味着其完全矿化或毒性降低，后续研究应进一步关注转化产物及生态风险。

3. 主要技术类型

3.1. 稳定塘与高效藻塘系统

稳定塘(waste stabilization ponds, WSP)是较早应用于污水处理的生态工艺之一，其净化作用与藻类和细菌之间的物质交换密切相关。藻类通过光合作用释放氧气，为好氧细菌降解有机物提供条件；细菌代谢产生的二氧化碳和无机营养盐又可被藻类利用，由此形成相互促进的过程[6]。传统稳定塘通常具有构造简单、运行管理相对方便等优点，但也存在占地需求较大、处理效果易受季节和天气影响等局限。高效藻塘(high-rate algal ponds, HRAP)通常采用较浅的池体，并通过机械混合促进藻液循环，以改善光照利用和传质条件(见图 1)。已有研究报道，HRAP 对总氮、总磷具有一定去除能力，具体效率受进水水质、温度、光照和水力条件影响[18]。其产生的藻类生物质具有潜在利用价值，但规模化应用仍需统筹土地需求、季节适应性和收获成本。

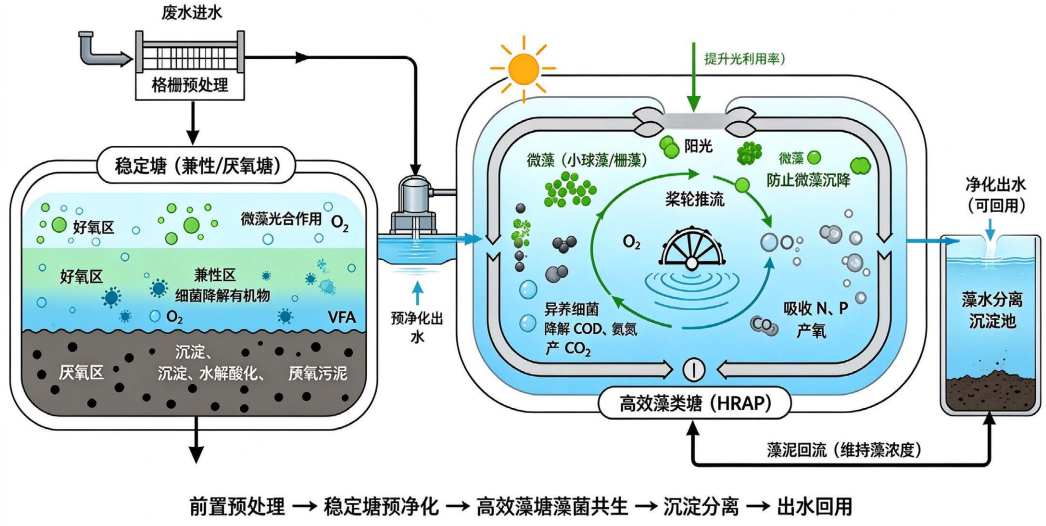


Figure 1. Mechanism of action for stabilization ponds and high-efficiency ponds
图 1. 稳定塘高效塘作用机制

3.2. 光生物反应器

光生物反应器(photobioreactor, PBR)通过对光照、温度、pH 及混合条件等参数进行调节，为微藻培养和废水处理提供相对可控的环境。与开放式塘体相比，封闭或半封闭式反应器通常具有占地相对集约、外源污染风险较低和运行参数易于调控等特点，但设备投资、混合及温控能耗也可能较高[4]。常见构型包括管式、平板式和柱式气升式反应器：管式装置可提供较大的受光面积，但需关注管路内传质和附着问题；平板式结构较为紧凑，光程较短，便于调节培养条件；柱式气升装置混合较温和，适用于部分对剪切较敏感的藻种。不同构型的适用性需结合藻种特性、废水水质及工程规模综合判断。

在废水处理流程中，PBR 可作为独立处理单元，也可与常规生化处理工艺衔接，用于进一步去除二级出水中的残余营养盐。已有实验室研究表明，在光照、停留时间及藻类生长条件适宜时，微藻反应器能够实现较高的氮、磷去除率；部分研究中总氮和总磷去除率均超过 90%，处理后出水达到相应的水回用水质要求[19]。除污染物去除率外，工程评价还应综合考虑出水稳定性、季节变化、能源投入、藻体分离及运行维护成本。较高的设备投资与运行能耗仍是此类系统扩大应用时需要权衡的因素。

3.3. 膜光生物反应器

膜光生物反应器(membrane photobioreactor, MPBR)将膜分离与微藻培养结合，可利用膜组件截留藻细胞，降低生物量随出水流失的风险。通过分别调节水力停留时间和固体停留时间，系统能够在维持一定藻体浓度的同时处理连续进水；膜分离也有助于获得悬浮物含量较低的出水，为后续回用或深度处理创造条件[20]。该工艺的潜在优势包括藻体截留效果较好、固液分离与生物反应相结合，以及反应器内生物量浓度较高等。文献报道的氮、磷去除效果存在差异，应结合进水特征和运行条件进行解读[6]。MPBR 的主要制约因素之一是膜污染：藻类胞外聚合物和废水中的胶体、颗粒物可能在膜表面累积，导致膜通量下降并增加清洗频率和运行费用。优化膜材料、曝气或水力条件，并评估长期运行中的污染控制成本，是后续研究的重要内容。

3.4. 菌藻共生生物膜系统

菌藻共生生物膜系统通过载体将微藻和细菌固定于相对稳定的结构中。与悬浮体系相比，该方式有

望提高局部生物量浓度、增强对负荷波动的承受能力，并降低后续藻体分离的难度[21]。生物膜通常经历微生物向载体迁移、初始附着以及持续生长和结构成熟等过程，胞外聚合物在微生物黏附和膜结构维持中发挥作用[12]。相关研究已将旋转式微藻生物膜用于餐厨垃圾沼液处理，并报告了总氮和总磷去除效果[22]。近年来，群体感应(Quorum Sensing, QS)在菌藻共生系统中的调控作用引起了研究者的关注。张等的研究表明，菌藻之间通过信号分子进行交流，协调生物膜的形成和功能，深入理解这一机制有助于优化菌藻共生系统的运行[21]。总体而言，载体性质、光照传递、膜层厚度及生物膜脱落等因素，均可能影响该技术的稳定运行。四种不同传统技术优缺点进行了主要对比，见表 1。

Table 1. Comparison of different technologies
表 1. 不同技术对比表

对比维度	高效藻塘(HRAP)	光生物反应器(PBR)	膜光生物反应器(MPBR)	菌藻共生生物膜
容积负荷	约 **0.05~0.30 kg N/m^3·d**；以实际水质和季节条件变化较大	约 **0.1~0.5 kg N/m^3·d**，高密度培养条件下可进一步提高	约 **0.2~1.0 kg N/m^3·d**，可通过膜截留维持较高生物量	约 **0.1~0.6 kg N/m^3·d**；菌藻协同可提高单位体积负荷
水力停留时间(HRT)	常见约 3~6 d	通常较 HRAP 短	部分研究可进一步缩短；膜使 HRT 与 SRT 解耦	典型约 5~10 d；附着生长使生物量不易随水流失
总氮去除率(TN)	50%~90%，优化条件下可 ＞90%	60%~95%	70%~99%	70%~95%，优化条件下可达到 90%以上
总磷去除率(TP)	40%~80%，优化条件下可 ＞80%	50%~90%	50%~100%，但受 P 形态和膜截留机制影响较大	60%~95%；菌藻协同和生物吸收/沉淀共同作用
光能利用效率	开放水面、光程长且受昼夜及天气影响	光程和光照条件可人工优化	高生物量维持能力强，但高浓度可能产生“暗区”	生物膜结构提高单位面积生物量，但厚膜可能造成内部遮光
单位体积投资成本	约 10~50 USD/m^3·(m^3/d)量级，具体随池体和配套设施变化	通常约为 HRAP 的 **10~40 倍**，不同 PBR 构型差异很大	在 PBR 基础上增加膜组件、泵及膜清洗系统	载体/填料增加投资，但通常低于封闭式 PBR/MPBR
单位水量运行成本	典型约 **0.02~0.10 USD/m^3**，主要为混合、泵送及收获	曝气、循环、光照/冷却及藻收获造成较高能耗	膜抽吸、曝气、膜清洗及膜更换是主要**成本**	曝气需求较低，但需考虑载体维护和生物膜脱落
主要优势	结构简单；能耗低；投资少；适合大规模处理；可利用自然光；运行维护相对简单	光利用和过程控制能力强；占地小；污染负荷适应范围较宽；易于实现高密度藻培养	SRT/HRT 可独立控制；可维持高藻浓度；出水悬浮物低；营养盐去除能力强；占地小	菌藻协同提高 COD、N、P 去除；生物量易于截留；曝气需求低；可形成较稳定的附着生物群落
主要缺点	占地大；受气候影响明显；光利用率低；藻泥沉降/收获困难；冬季效率下降	投资和运行成本高；污染和结垢控制复杂；高藻浓度容易产生光限制	膜污染是核心问题；膜更换和清洗成本高；能耗较高；系统复杂	生物膜厚度及结构难控制；易发生脱膜；传质/光传递受限；菌藻群落稳定性受环境影响

3.5. 合成生物与人工智能

随着合成生物学、基因编辑及人工智能技术的发展，微藻废水处理正由传统的“优势藻种筛选”向

“定向改造藻种–智能优化运行”方向发展。合成生物学可利用 CRISPR/Cas9 等基因编辑工具对微藻代谢途径进行精准调控，从而增强其环境胁迫耐受性、营养盐吸收能力及生物量生产效率。已有研究系统总结了 CRISPR/Cas9、TALEN 和 ZFN 等技术在微藻遗传改造及废水生物修复中的应用潜力[23]。与此同时，人工智能和机器学习为微藻反应器的动态调控提供了新的技术手段。通过建立 pH、温度、光照强度、水力停留时间及营养盐浓度与藻生物量、氮磷去除效率之间的非线性关系，可利用人工神经网络、随机森林、支持向量机和遗传算法预测系统运行状态并优化操作参数[24]。例如，Meenatchisundaram 等利用 7 种机器学习模型预测微藻废水处理过程中的生物量，其中 ANN 模型取得了较高的预测精度，并进一步结合遗传算法实现运行条件优化[25]。最新研究进一步提出将 AI 预测模型、机制模型与实时过程控制相结合，以推动微藻废水处理由经验型运行向数字化、智能化和精准控制转变[26]。

4. 在不同废水类型中的应用

4.1. 生活污水处理

生活污水中通常含有微藻生长所需的氮、磷及一定量有机物，因此是微藻处理研究较为集中的对象之一。采用高效藻塘处理生活污水的研究报告了对生化需氧量(BOD)及氮、磷的去除效果，但不同研究之间的数值会随进水水质、季节和运行参数而变化[18]。通过与其他类型废水协同处理，有时可以调整营养元素比例并改善藻类生长条件，但需同时评估混合进水中潜在抑制性物质的影响[8]。在菌藻共生系统中，微藻光合作用产生的氧可供好氧细菌利用，细菌产生的无机碳和营养盐又可支持藻类生长，因此在一定条件下有望降低外部曝气需求。

4.2. 工业废水处理

工业废水的来源和组成差异较大，印染、食品加工及造纸等废水可能含有有机物、色度物质和不同水平的营养盐，部分水流具有微藻处理或协同处理的研究价值。以印染废水为例，其色度高、组分复杂，且部分有机物可生化性较差。中国科学院海洋研究所的研究团队从印染废水中分离出索罗金小球藻(*Chlorella sorokiniana*)，并与河流弧菌构建了菌藻协同处理系统，对特定印染废水表现出较好的 COD 去除和脱色效果[27]，但此类结果与废水组成、藻菌组合及实验条件密切相关。食品加工废水含有碳水化合物、蛋白质和油脂等组分，可为微藻生长提供部分营养来源，所得生物质也具有进一步利用的可能。另一方面，工业废水中可能存在重金属、有机溶剂、盐分或其他抑制性物质，直接处理可能影响藻体生长和系统稳定性。因此，实际应用前应进行水质表征，并根据需要开展预处理、稀释或耐受藻种筛选与驯化。

4.3. 养殖废水处理

畜禽养殖废水通常含有较高浓度的氮、磷及有机物，若处理不当，可能加重周边水环境负荷。针对这类废水，已有研究尝试将微藻与厌氧氨氧化等生物过程耦合，以发挥不同功能微生物的互补作用。唐等构建了厌氧氨氧化污泥与小球藻耦合的双生物微生物燃料电池系统，并报告了氨氮和总磷去除效果[28]。水产养殖废水则更强调处理后水质的稳定性及回用安全。膜曝气生物膜光反应器用于低盐度养殖废水的研究显示，在特定盐度和运行条件下可获得较高的总无机氮去除率[29]。

5. 现存挑战与未来发展方向

5.1. 主要挑战

尽管微藻废水处理兼具污染物去除、碳固定和资源回收潜力，但由实验室研究向长期、规模化工程

应用转变仍受到经济性、能耗和环境效益等多重因素制约。首先，微藻生长及污染物去除具有较强的水质和环境依赖性，不同废水的营养盐比例、盐度、有机物组成及毒性物质均可能导致藻种性能发生明显变化；实际运行中的季节性光照和温度波动、杂藻及捕食者入侵，也会降低系统长期稳定性。其次，微藻生物量浓度较低且细胞粒径小，收获、浓缩和脱水通常需要絮凝、过滤或离心等单元，使下游处理成为影响整体经济性的重要环节。近年来的技术经济分析(TEA)表明，开放式藻塘虽然具有较低的资本投入和运行能耗，但土地需求较大；封闭式光生物反应器则具有较好的过程控制能力，却面临较高的资本和能源成本。

因此，仅依据氮磷去除率评价微藻技术并不足以判断其工程可行性。生命周期评价(LCA)显示，电力消耗、CO_2供应、藻体收获及干燥等环节可能成为环境影响的主要热点，其结果还明显受到能源结构、系统边界和资源化路径的影响。已有中试尺度研究表明，合理结合厌氧消化和能源回收可降低系统整体能源消耗，并改善生命周期环境表现。此外，废水来源藻生物质可能富集重金属、病原体及新污染物，其资源化利用必须建立在污染物风险评估和产品安全评价基础上。因此，微藻技术的评价应从单一污染物去除逐步转向技术、经济和环境效益的综合衡量。

5.2. 未来发展方向

未来研究应重点推动微藻废水处理由“高效去除”向“低成本、低能耗和资源化协同”发展。首先，应加强优势藻种筛选、驯化及定向改良，并在真实废水和长期波动条件下开展中试验证，同时关注工程藻种的生态安全。其次，应优化反应器结构及耦合工艺，通过强化光传递、气液传质和生物量截留，降低曝气、混合及收获能耗；开放式藻塘、PBR、生物膜和膜分离等技术可根据土地条件、水质要求和资源化目标进行组合。

更重要的是，应将 TEA 与 LCA 贯穿技术开发和工程设计全过程。未来研究应针对土地、能源、CO_2供应、混合曝气、藻体收获和干燥等关键成本与能耗环节开展敏感性分析，并比较不同区域能源结构和运行模式下的经济与环境表现。研究表明，单纯依赖生物燃料销售往往难以支撑微藻系统的经济性，而将污水处理收益、营养盐回收、碳减排价值与高值产品协同纳入多产品生物精炼体系，可显著提高项目可行性[31]。因此，未来应建立“污染物去除–资源回收–能源消耗–碳排放–经济收益”一体化评价框架，并结合人工智能和数字化控制实现运行参数动态优化，从而推动微藻废水处理由实验室概念验证向长期稳定、经济可行和环境友好的工程应用转变。

6. 结论

微藻处理废水兼具污染物去除与生物质形成的潜力，相关研究已覆盖营养盐、部分重金属及新兴污染物，并形成稳定塘、高效藻塘、光生物反应器、膜光生物反应器和菌藻共生生物膜等多种技术路线。不同系统在处理效率、占地需求、能耗、运行控制和藻体收获方面各有特点，需根据废水水质与应用目标进行选择。现阶段，藻种在真实废水中的适应性、固液分离成本、长期运行稳定性，以及生物质资源化过程中的污染物安全风险，仍是影响工程应用的重要因素。未来研究应加强真实水质和连续运行条件下的验证，完善能耗与经济性评价，并推动低成本收获、工艺耦合及生物质安全利用技术的发展。只有在污染控制效果、运行可靠性和资源化收益之间取得平衡，微藻废水处理技术的应用潜力才能得到更充分发挥。

参考文献

[1] Shahid, A., Malik, S., Zhu, H., Xu, J., Nawaz, M.Z., Nawaz, S., *et al*. (2020) Cultivating Microalgae in Wastewater for

Biomass Production, Pollutant Removal, and Atmospheric Carbon Mitigation; a Review. *Science of The Total Environment*, **704**, Article 135303. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135303

[2] Zhang, X. and Liu, Y. (2022) Resource Recovery from Municipal Wastewater: A Critical Paradigm Shift in the Post Era of Activated Sludge. *Bioresource Technology*, **363**, Article 127932. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127932

[3] 王今妨, 钱锋, 谢晓琳, 等. 生物炭基材料强化生态处理工艺效能的作用机制与研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2026, 16(2): 516-528.

[4] 赵江, 侯琤, 沈峥, 等. 微藻在农业可持续发展中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 14-25.

[5] Kong, W., Shen, B., Lyu, H., Kong, J., Ma, J., Wang, Z., *et al*. (2021) Review on Carbon Dioxide Fixation Coupled with Nutrients Removal from Wastewater by Microalgae. *Journal of Cleaner Production*, **292**, Article 125975. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125975

[6] 周浩媛, 等. 微藻技术在污水处理中的应用与展望[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(11): 160-171.

[7] 李苏洁, 陈姗姗, 栾天罡. 藻菌共生处理污水的机制与应用研究进展[J]. 微生物学报, 2022, 62(3): 918-929.

[8] Calijuri, M.L., Do Couto, E.D.A., Assemany, P.P., Ribeiro, V.J., Lorentz, J.F., Castro, J.D.S., *et al*. (2025) Microalgae-Based Wastewater Treatment and Biomass Valorization: Insights, Challenges, and Opportunities from 15 Years of Research. *ACS Omega*, **10**, 49273-49299. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c04364

[9] Kundu, P., Dutta, N. and Bhattacharya, S. (2024) Application of Microalgae in Wastewater Treatment with Special Reference to Emerging Contaminants: A Step towards Sustainability. *Frontiers in Analytical Science*, **4**, Article ID: 1513153. https://doi.org/10.3389/frans.2024.1513153

[10] 贺昭铭, 陈志鹏, 余圣, 等. 藻菌共生污水处理技术应用现状和技术挑战[J]. 能源环境保护, 2025, 39(1): 73-86.

[11] 王荣昌, 程霞, 曾旭. 污水处理中菌藻共生系统去除污染物机理及其应用进展[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 13-22.

[12] 廖怀玉, 孙丽, 李济斌, 何頔. 菌-藻共生生物膜污水处理研究进展[J]. 土木建筑与环境工程, 2021, 43(4): 137-146.

[13] 陈彪, 朱勇, 王锴瑜, 等. 藻菌共生系统处理畜禽沼液的机制及影响因素研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 14-24.

[14] 杨荧, 刘莉文, 李建宏. 微藻富集重金属的机制及在环境修复中的应用综述[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 88-94.

[15] Mahlangu, D., Mphahlele, K., De Paola, F. and Mthombeni, N.H. (2024) Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review. *Water*, **16**, Article 718. https://doi.org/10.3390/w16050718

[16] 谢攀. 微藻系统去除废水中氮硫与典型抗生素效能及机制[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.

[17] 吴亨宇, 熊倩, 孙悦宏, 等. 微藻-细菌协同去除抗生素机理及其共适应机制[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4354-4365.

[18] 李胜男, 纪雄辉, 朱坚, 等. 藻类在农业面源污染防控中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 970-979.

[19] Bellucci, M., Marazzi, F., Naddeo, L.S., Piergiacomo, F., Beneduce, L., Ficara, E., *et al*. (2020) Disinfection and Nutrient Removal in Laboratory-Scale Photobioreactors for Wastewater Tertiary Treatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, **95**, 959-966. https://doi.org/10.1002/jctb.6010

[20] Luo, Y., Le-Clech, P. and Henderson, R.K. (2016) Simultaneous Microalgae Cultivation and Wastewater Treatment in Submerged Membrane Photobioreactors: A Review. *Algal Research*, **24**, 425-437. https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.10.026

[21] 张哲, 郑华宝, 王敏. 废水处理中微藻-细菌共生系统的群体感应[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(X): 1-12.

[22] 柳珊, 郭春春, 林舒芃, 等. 不同附着材料对旋转式微藻生物膜系统处理餐厨垃圾沼液的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(15): 244-253.

[23] Hassanien, A., Saadaoui, I., Schipper, K., Al-Marri, S., Dalgamouni, T., Aouida, M., *et al*. (2023) Genetic Engineering to Enhance Microalgal-Based Produced Water Treatment with Emphasis on CRISPR/Cas9: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article ID: 1104914. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1104914

[24] Kumar, R.O., Pulimoottil, A.B., Tiamenla, L., *et al*. (2023) Artificial Intelligence and Machine Learning Tools for High-Performance Microalgal Wastewater Treatment and Algal Biorefinery: A Critical Review. *Science of the Total Environment*, **876**, 162797-162797.

[25] Meenatchisundaram, K., Gowd, S.C., Lee, J., Barathi, S. and Rajendran, K. (2024) Data-Driven Model Development for Prediction and Optimization of Biomass Yield of Microalgae-Based Wastewater Treatment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **63**, Article 103670. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103670

[26] Sundaram, K.M., Elumalai, R., Aguado, A.J.F., Juneja, A. and Rajendran, K. (2026) Artificial Intelligence Driven Microalgal Wastewater Treatment: Predictive Modeling, Optimization, and Process Integration. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **91**, Article 105118. https://doi.org/10.1016/j.seta.2026.105118

[27] 海洋所在利用海藻生物处理高盐有机废水研究方面取得新进展[EB/OL]. https://siottp.shou.edu.cn/2024/1122/c16574a336064/page.htm, 2024-11-12.

[28] 唐方毅, 薛溢涵, 贾律伦, 等. 厌氧氨氧化污泥耦合小球藻的双生物微生物燃料电池处理养殖废水研究[J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(2): 222-229.

[29] Xia, Z., Ng, H.Y. and Bae, S. (2025) Synergistic Microalgal-Bacterial Interactions Enhance Nitrogen Removal in Membrane-Aerated Biofilm Photoreactors Treating Aquaculture Wastewater under Salt Stress: Insights from Metagenomic Analysis. *Water Research*, **283**, Article 123878. https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123878

[30] Zheng, X., Liu, R., Li, K., Sun, J., Wang, K., Shao, Y., *et al*. (2025) Microalgae-Bacteria Symbiosis Enhanced Nitrogen Removal from Wastewater in an Inversed Fluidized Bed Bioreactor: Performance and Microflora. *Frontiers in Microbiology*, **16**, Article ID: 1591974. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1591974