

基于微藻的废水处理及油脂积累研究进展

朱黎妍, 乔腾生, 赵永腾, 余旭亚

(昆明理工大学 生命科学与技术学院, 昆明 650500)

摘要:水资源危机和对环境污染的担忧推动了传统废水处理工艺的升级。微藻可大量积累油脂等高附加值次级代谢产物,而微藻在废水中培养,可同时满足获取微藻生物质和废水处理的需求。综述了微藻培养与废水处理相结合的特点,阐述了微藻废水处理工艺,包括光生物反应器、生物膜-光生物反应器、微藻-细菌共培养、微藻型微生物燃料电池以及耦合植物生长调节剂,对提高废水中微藻生物活性、产油能力和废水处理效率的作用。鉴于废水组成的复杂性和微藻的适应性,还需创新废水微藻培养工艺与技术以实现更高的废水生物修复效率和微藻高附加值产物产率。

关键词:微藻;废水处理;油脂积累

中图分类号:Q936;TS222

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2023)04-0105-08

Advances in microalgae – based wastewater treatment and lipid accumulation

ZHU Liyan, QIAO Tengsheng, ZHAO Yongteng, YU Xuya

(Faculty of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The crisis of water resources and the worry about environmental pollution promote the upgrading of traditional wastewater treatment process. Microalgae can accumulate lots of high value – added secondary metabolites such as lipids. Microalgae cultivation in wastewater can simultaneously meet the requirements of obtaining microalgae biomass and wastewater treatment. The characteristic of combining microalgae cultivation with wastewater treatment was reviewed, and the role of microalgae – based wastewater treatment processes, including photobioreactors, biofilm – photobioreactors, microalgae – bacterial consortia, microalgae – microbial fuel cells and coupled plant growth regulators, in improving the microalgae biological activity, lipid production capacity and wastewater treatment efficiency were described. In view of the complexity of wastewater composition and the adaptability of microalgae, innovative microalgae – based wastewater processes and technologies are also needed to achieve higher wastewater bioremediation efficiency and yield of high value – added products from microalgae.

Key words: microalgae; wastewater treatment; lipid accumulation

近年来,人口数量的增长及城市化和工业化的高速发展,导致水资源日益短缺、污染严重。城市生活、工业生产和农业活动会产生有机碳、氮、磷及金属元素超标废水,排放后会造水体富营养化,破坏

土壤结构,对水生生物和人类健康造成有害影响^[1-2]。因此,废水的排放与处理一直备受关注。

废水处理分为3个级别:一级处理通常采用物理方法进行,去除废水中易沉降的物质;二级处理常通过化学或生物方法去除废水中的可溶性物质和胶体物质^[3-4];三级处理又称深度处理,是经一级、二级处理后,为了达到一定的回用水标准而采用的工艺技术,目的是进一步去除难降解的有机污染物和氮、磷等可溶性无机污染物,主要方法有活性炭吸附与离子交换等物理、化学方法和利用微生物脱氮除磷等^[5-6]。处理废水的微生物通常为细菌、真菌,而

收稿日期:2022-01-25;修回日期:2022-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(32160868)

作者简介:朱黎妍(1998),女,硕士研究生,研究方向为微藻培养及代谢调控(E-mail)zhuliyani025@163.com。

通信作者:余旭亚,教授,博士生导师,博士(E-mail)xuya_yu@163.com。

微藻由于其适用性广泛,对污染物和营养成分的吸附能力更强,以及所产生的微藻生物质可应用于制备生物燃料等特点,成为目前废水处理研究的热点^[7-8]。一方面,在废水中培养微藻降低了废水处理成本;另一方面,废水为微藻培养提供了廉价替代培养基,废水中含有丰富的营养成分,可以促进微藻生长,从而提高微藻生物质产量和油脂产量。本文综述了微藻培养与废水处理相结合的特点,以及5种微藻废水处理工艺,以期为提高废水处理效率和废水中微藻产油能力提供参考。

1 微藻培养与废水处理相结合的特点

作为光合微生物,微藻与植物相似,具有叶绿体,并能通过光合作用提供能量进行生长代谢^[9]。微藻广泛存在于淡水、海水、不同来源废水等各种水环境中,它可以利用废水中的氮、磷等营养成分供自身生长,同时去除废水中的化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)等多种污染物,且去除率高^[10-11]。

将微藻培养与废水处理相结合是一种经济、环境友好的方法,在提高微藻产油能力,简化废水处理过程,降低微藻生物质生产成本和废水处理成本,去除污染物,捕集、固定和利用 CO_2 等方面具有诸多优势^[12-13]。部分藻种具有固氮、固磷作用,可利用有机和无机氮化合物合成氨基酸和蛋白质^[14-15]。废水处理后的微藻生物质可用于生产碳水化合物、色素、蛋白质等高附加值产品^[16]。另外,相比于传统油料作物,微藻生长快、油脂含量高(一般为20%~70%,干基)^[17],且微藻油脂大多是中性油脂^[18],是具有良好的发展前景的第三代生物柴油原料,经生物炼制可转化为清洁、环保的生物柴油^[19]。利用废水作为微藻生长的廉价替代培养基,可降低微藻油脂生产成本,实现与废水处理的耦合^[12, 20]。

利用微藻处理废水的传统方法是将微藻细胞与废水直接混合,该方法已成功应用于市政、农业和工业废水等不同类型的废水处理^[21-22]。然而废水的内环境复杂,其中的有毒物质可能会对微藻生长和代谢产生不利影响,导致微藻生长缓慢甚至死亡,降低微藻生物质产量和油脂产量。考虑到废水对微藻的不利影响,目前提高微藻在废水中活性的常见方法有:①藻种的筛选与驯化^[23],筛选、驯化后的藻种不仅能够快速生长,还能耐受不同类型废水及环境因素的变化;②对废水进行改造或选择合适水质供微藻利用,如将废水与海水混合^[24]。但通过上述方法改进,微藻的生物活性、油脂产率仍然较低,还需

要结合不同的微藻培养工艺来提高微藻附加值产物产率和废水生物修复效率。

2 微藻在废水中的培养工艺

2.1 单一工艺——光生物反应器

在微藻培养体系中,光生物反应器(Photobioreactor, PBR)的使用对控制和监测微藻生理状况发挥着重要作用,诸多基于微藻的废水处理技术都是以此为基础的。

PBR分为开放式和封闭式2类:开放式PBR主要为跑道池式,其设计简单,运行和维护成本低,可应用于大规模培养体系;封闭式PBR分为柱式、平板式、管道式和搅拌型,主要用于实验室和小试规模,应用较广泛。封闭式PBR是将微藻放置于透明、薄壁、易控温的培养容器中,可根据微藻的最佳生长条件进行设计、调控,以增加微藻生物质产量和油脂产量^[25-26]。传统的封闭式PBR是一个三相系统,液相为培养基,固相为细胞,气相为富含 CO_2 的空气(见图1)。另外,PBR中的光是叠加的辐射场,被称为第四相^[27]。

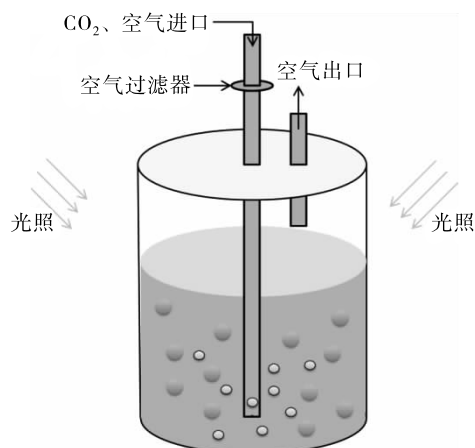


图1 传统封闭式PBR示意图

PBR中微藻废水处理效果的主要影响因素有光照强度、光周期和PBR的设计。Iasimone等^[28]在PBR中研究了光照强度对微藻处理城市废水的影响,发现在光照强度为20、50 $\mu\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 和100 $\mu\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 时,相同的培养时间内,随着光照强度的增强,微藻生物质产量、油脂含量和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除速率不断增加,微藻的光合活性增强。而Han等^[29]研究发现,微藻的油脂含量并不随着光照强度的增强而不断增加,在达到光饱和点后,光照强度继续增加会导致微藻细胞中活性氧积累,进而抑制光合作用。Rani等^[30]在PBR中考察了光周期对生活废水中小球藻*Chlorella sorokiniana*的影响,发现光/暗周期为24 h/0 h时,小球藻的最高生物质产量为1.31 g/L,是光/暗周期12 h/12 h条件下的1.25

倍,同时 TN、TP 去除率也达到最高,连续光照条件改善了该藻株的生物质生产能力和废水生物修复效率。Cheah 等^[31]研究发现,在由丙烯酸材料制成的薄壁、透光性更强的新型 PBR 中用小球藻 *Chlorella sorokiniana* CY-1 处理棕榈油厂的废水,生物质产量和油脂含量分别达到 5.74 g/L、14.43%,相比玻璃制 PBR 分别增加 2.3 倍和 2.9 倍,丙烯酸制 PBR 中废水的 COD、TN 去除率也较玻璃制 PBR 有所提高,分别达到 93.7%、98.6%。上述结果表明,适宜的光照强度、光周期和有效设计的 PBR,有利于微藻生长和油脂生产,且有助于废水生物修复。

PBR 的主要优势在于微藻生长可控,具有较低的污染风险,且可通过调节光照强度等因素对微藻代谢途径进行微调。设计合理的 PBR 有助于微藻生物燃料的生产和提高废水修复效率,但 PBR 的运行维护成本高。

2.2 集成工艺

2.2.1 生物膜-光生物反应器

在生物膜-光生物反应器培养技术中,微藻细胞附着在载体的表面生长,形成生物膜,且生物质产量大,在微藻生长成熟后,可直接通过机械方法刮取微藻细胞^[32],简化了高附加值产物的采收过程,降低了成本。

相比于悬浮模式,微藻的生物膜固定化形式可产生大量的胞外聚合物,可提供官能团及结合位点与污染物相结合^[33],生物膜上的藻细胞也可以更有效地吸收光源^[34],保持良好的生物活性,有利于微藻对废水的修复和微藻生物质及高附加值产物的积累。Wu 等^[35]在生物膜-光生物反应器中用小球藻 *Chlorella vulgaris* UTEX2714 处理猪粪废水,发现废水中 COD、TP、TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为 95.67%、64.40%、69.55% 和 91.24%,均高于悬浮对照组,实现了猪粪废水的深度净化,另外,生物膜组的微藻生物量达到 5.65 g/L,是悬浮对照组的 22.6 倍。王愿珠等^[36]研究表明,将猪粪沼液废水稀释 5 倍后,贴壁培养小球藻对废水中污染物的去除率最佳,此时小球藻中油脂含量高达 32.7%。

生物膜-光生物反应器中,藻种、废水来源、微藻附着的载体材料性质等均会影响微藻生长状况和对废水的处理效率^[37]。如何控制培养、优化不同环境中微藻的生长成为生物膜-光生物反应器用于微藻处理废水和油脂积累的主要问题。此外,目前生物膜-光生物反应器商业化应用非常有限,尚需安装、操作和系统维护的经验数据及可靠的经济可行性分析。

2.2.2 微藻-细菌共培养

虽然微藻已成功应用于不同类型的废水处理,但在废水处理过程中,微藻和细菌组成的藻菌共生系统比单独使用微藻更具优势。

在废水处理中利用微藻与细菌的共生关系,可提高污染物的去除效率和微藻生物质产率。微藻利用废水中的营养物质进行光合作用,积累生物质,并释放出可被细菌利用的碳源、有机物及 O_2 ,而细菌氧化有机物,释放出微藻光合作用所需的 CO_2 ,由此实现微藻和细菌的协同生长^[38]。但微藻和细菌之间的协同作用比简单的营养成分交换复杂。微藻可作为细菌的栖息地,保护细菌免受不利环境条件的侵害,并释放胞外代谢产物来促进细菌的生长^[39-40]。Mandal 等^[41]研究证实,前环藻 *Amphidinium carterae* 产生的胞外聚合物,如半乳糖和葡萄糖,可促进短小芽孢杆菌 *Bacillus pumilus* 的生长。细菌提供了微藻生长所需的促生长因子和其他重要营养元素,如维生素和铁载体(在铁缺乏条件下螯合三价铁以促进微藻生长)^[42-43]。Kumsiri 等^[44]将放线菌 *P. intestinalis* WA3 与斜生四链藻 *Tetrademus obliquus* AARL G022 在沼渣废水中共培养,发现微藻-细菌间的协同作用有利于废水中污染物的去除,并且放线菌产生的吡啶-3-乙酸和苷酸促进了微藻生长,脂质产量达到 25.09 mg/(L·d),是仅使用微藻对照组的 1.55 倍。在微藻-细菌共培养系统中,微藻-细菌比例对废水处理效率有一定影响。张波等^[45]利用棕鞭藻 *Ochromonas* sp. 和水单胞菌共培养以处理造纸废水,优化得到藻菌最佳比例为 1:3,在最佳体系中培养 8 d,废水中 COD、TN、TP 去除率分别达 75.67%、35.19% 和 90.2%,均高于纯藻体系和纯菌体系。Leong 等^[46]用活性污泥作为菌种来源与小球藻共培养处理富氮废水,发现随着初始微藻接种比例从 25% 增加至 100%,TN 去除率从 $(43.95 \pm 1.47)\%$ 增加至 $(97.58 \pm 0.26)\%$,活性污泥硝化产生的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 刺激微藻通过同化吸收氮,使微藻生物质产量和油脂产量增加,当藻菌比例为 0.75:1 时,油脂产量最高,为 130 mg/L。微藻-细菌共培养系统的种群动态可有效处理成分复杂的废水。

藻株和菌株的选择、物种间相互作用的复杂性、应用模式及最佳的微藻-细菌比例对提高废水修复效率和微藻油脂积累都具有重要影响。但在利用微藻-细菌共培养系统时,温度、光照条件以及微藻与细菌间尚未清楚的相互作用等可能导致共培养系统

不稳定。此外,不同的微藻与细菌间存在多种组合,开发出高效的、可同时用于废水处理和微藻油脂生产的共培养系统有待进一步研究。

2.2.3 微藻型微生物燃料电池

微藻型微生物燃料电池 (Microalgae - microbial fuel cell, M - MFC) 可以有效去除废水中的氮、磷,同时提高微藻的油脂积累。M - MFC 可以被构建与设计为单极室、双极室、三极室或沉积型等,而微藻在 M - MFC 中可作为阳极底物、生物阳极或生物阴极而发挥作用^[47-48]。其中,最基本且应用广泛的是以微藻作为阴极的双极室 M - MFC (见图 2)。阳极处发生氧化反应,细菌将废水中有机物的化学能转化为电能,从而降低 COD 并产生电子和质子,电子通过外部电路流向阴极,质子穿过质子交换膜到达阴极并与还原剂 (O_2) 反应生成 H_2O 。在 M - MFC 阴极中,利用微藻的主要目的是产生 O_2 ,并将其释放回阴极电解液以完成还原反应,同时吸收氮和磷,再与阳极处的氧化反应相结合以产生生物电,避免了在阴极通过曝气来供应 O_2 ,从而降低废水处理过程中 M - MFC 的操作成本^[49-51]。与传统的废水处理相比,M - MFC 的优势包括:①从 M - MFC 中回收微藻产物更方便,如阴极电极上会形成光合生物膜,只需刮擦即可得到微藻生物质,并且微藻生长与废水中营养物质的回收呈协同关系;②有效隔离和利用 CO_2 ;③微藻光合作用产生 O_2 ,用作阴极中的电子受体;④展现了可再生能源发电及生物燃料生产的潜力^[52-53]。

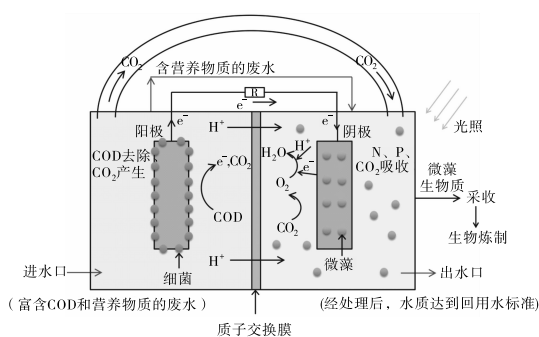


图 2 双极室 M - MFC 原理示意图

Nayak 等^[54]采用两步法,先在 PBR 中用栅藻 *Scenedesmus abundans* 预处理制药废水,COD、TN、TP 的最高去除率分别为 $(77 \pm 3)\%$ 、 $(82.0 \pm 0.5)\%$ 、 $(65.9 \pm 0.4)\%$,油脂含量为 42%,然后在光合微生物燃料电池 (Photosynthetic microbial fuel cell, PMFC) 中进一步处理,COD、TN、TP 总去除率分别提高到 97.24%、97.12% 和 93.71%,油脂含量增加到 45%。Yang 等^[55]开发了一种 PMFC 堆,通过铵

盐从阳极电解液向阴极电解液的迁移,可为微藻的连续生长提供氮源,约 98% 的铵被去除,TN 去除率为 88.6%,油脂含量达到 32.2%。在另一项研究中,Yang 等^[12]将微藻生物膜引入 M - MFC 中,建立了微藻生物膜微生物燃料电池 (An algae biofilm microbial fuel cell, ABMFC),该系统比单独使用生物膜或微生物燃料电池具有更高的污染物去除率和油脂产量。另外,微藻生物膜的存在减轻了微藻与电化学活性细菌之间的不利影响。在实际应用中,微藻生物膜与 M - MFC 的联用还可以减少由于 M - MFC 长期连续运行造成的微藻生物质损失和污染。

M - MFC 的大规模应用仍受到电极成本和使用寿命的限制。但当采收的微藻生物质用于生物柴油生产时,这些成本可通过资源回收再利用的方式得到补偿。

2.2.4 耦合植物生长调节剂

植物激素 (Phytohormone) 是一种信号分子,天然存在于植物体内,能以较低浓度调节植物生长、发育等过程,可促进微藻的生长和脂质的合成^[56-57]。而植物生长调节剂 (Plant growth regulator) 是人工合成的、具有植物激素活性、并对植物生长发育具有调节作用的化学物质,其在微藻生长、代谢产物生产以及极端环境耐受等方面能发挥较好的调节作用^[58-59]。Zhao 等^[60]研究发现,在高氨废水处理中,外源植物生长调节剂吲哚 - 3 - 乙酸 (IAA)、玉米素 (ZT) 和油菜素类固醇 (Br) 的添加可以维持微藻的稳定生长,并减轻氨胁迫对氮代谢的负面影响。另外,耦合植物生长调节剂对微藻废水处理的同时对积累生物质和油脂具有积极作用。Liu 等^[61]研究发现,啤酒废水 (Brewery effluent, BE) 耦合植物生长调节剂 1 - 萘乙酸 (NAA) 可提高 *Coccomyxa subellipsoidea* 的油脂含量 (高达 54.56%),较对照组 (单一 BE) 提高了 1.57 倍,大量的脂质积累可归因于 BE 耦合 NAA 策略驱动了大部分源自三羧酸循环和糖酵解途径的乙酰辅酶 A 流入脂质积累途径,另外,生物质产量和 TN、TP 去除率均高于对照组,外源 NAA 的添加提高了微藻生物质积累并降低了废水中污染物的含量。Dong 等^[62]在糖蜜废水 (Molasses wastewater, MW) 中添加褪黑素,显著提高了单链藻 *Monoraphidium* sp. FXY - 10 的油脂含量,油脂含量最高为 68.69%,是对照组 (未添加褪黑素) 的 1.15 倍,同时,COD、TN、TP 去除率分别为 92.33%、90.07% 和 86.04%,相比对照组分别提高了 10.79%、13.38% 和 10.81%。Qiao 等^[63]在 MW 中添加肌醇,微藻的油脂含量达到 59.96%,COD、

TN、TP 的去除率分别为 91.64%、79% 和 57.36%，相比对照组(未添加肌醇)显著提高,这可能是由于外源植物生长调节剂调节了微藻在废水中的生理代谢,提高了对污染物的吸收利用。

耦合植物生长调节剂为增强废水处理效率和微藻油脂积累提供了一种有效且环保的策略,微藻在废水中表现出更佳的生长和代谢物积累,可以减少环境对微藻的毒性,同时降低废水处理和生物燃料生产的成本。目前有关植物生长调节剂用于微藻废水处理与代谢产物合成相结合的研究报道较少,有待深入研究。

3 结语

与传统废水处理相比,基于微藻的废水处理工艺具有显著优势,同时也符合废水处理耦合微藻油脂积累的新趋势。但微藻处理废水还存在一些问题和局限性。不同类型的废水具有不同的成分,废水污染(有毒物质)可能会影响并抑制微藻的生长,微藻生长同时也受温度和废水浊度等的影响。基于废水的复杂性和微藻的适应性,如何设计、运行和优化这些工艺是其能否成功应用的关键。虽然已有许多研究证明了废水中微藻的生物修复特性,但大部分是在实验室或中试规模上进行的,扩大至生产规模上,性能与经济可行性可能会有所不同。另外,从废水中回收微藻生物质时,尽管已经引入了一些技术,但采收过程仍需要高成本投入,在工艺改进中需要引入更高效的自动化设计代替人力,以提高整体经济性。

基于微藻的废水处理工艺整合到实际应用中,将废水处理、微藻培养与生物柴油生产相结合,是生物炼制循环经济极具前景的策略。但是,在生物柴油生产得以产业化应用之前,还需进行更多的研究以创新废水微藻培养工艺与技术,包括:①开发适用于多种废水的工程微藻,如使用化学诱变方法、等离子诱变等物理诱变方法,在废水中长时间传代驯化,获得高耐受力的藻株;②评估更多种类的植物生长调节剂、化学调节剂,如独脚金内酯、茉莉酸、褪黑素、黄腐酸等,对废水中微藻生长及油脂积累的影响;③将不同工艺技术联合,有针对性地提高微藻在废水中的活性、生物量及油脂产量,实现扩大繁殖培养;④结合多组学和分子遗传学等手段,全方位、深层次地解析微藻对废水的响应机制,将微藻真正整合进入废水的资源化利用。

参考文献:

[1] 余光辉,朱佳文,张勇,等. 化工厂污染区复垦后的土壤和蔬菜重金属含量与风险评估[J]. 土壤通报, 2015(3): 728 - 732.

- [2] MA C, WEN H, XING D, et al. Molasses wastewater treatment and lipid production at low temperature conditions by a microalgal mutant *Scenedesmus* sp. Z - 4 [J/OL]. *Biotechnol Biofuels*, 2017, 10: 111 [2022 - 01 - 25]. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0797-x>.
- [3] ESFAHANI N R, MOBAREKEH M N, HOODAJI M. Effect of grit chamber configuration on particle removal: using response surface method[J]. *J Membr Sep Technol*, 2018, 7: 12 - 16.
- [4] CARMALIN S A, LIMA E C. Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption [J]. *Ecotox Environ Safe*, 2017, 150: 1 - 17.
- [5] CHOI S, YOON H, SON H, et al. Removal efficiency of organic micropollutants in successive wastewater treatment steps in a full - scale wastewater treatment plant: bench - scale application of tertiary treatment processes to improve removal of organic micropollutants persisting after secondary treatment [J/OL]. *Chemosphere*, 2022, 288: 132629 [2022 - 01 - 25]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132629>.
- [6] ARZATE S, PFISTER S, OBERSCHELP C, et al. Environmental impacts of an advanced oxidation process as tertiary treatment in a wastewater treatment plant[J/OL]. *Sci Total Environ*, 2019, 694: 133572 [2022 - 01 - 25]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.378>.
- [7] ZHANG Q, YU Z, ZHU L, et al. Vertical - algal - biofilm enhanced raceway pond for cost - effective wastewater treatment and value - added products production [J]. *Water Res*, 2018, 139(1): 144 - 157.
- [8] SINGH V, MISHRA V. Exploring the effects of different combinations of predictor variables for the treatment of wastewater by microalgae and biomass production [J]. *Biochem Eng J*, 2021, 174:108 - 129.
- [9] PIRES J C, ALVIM - FERRAZ M C, MARTINS F G, et al. Wastewater treatment to enhance the economic viability of microalgae culture [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2013, 20(8): 5096 - 5105.
- [10] NIGAM P S, SINGH A. Production of liquid biofuels from renewable resources[J]. *Prog Energy Combust Sci*, 2011, 37(1): 52 - 68.
- [11] GULDHE A, KUMARI S, RAMANNA L, et al. Prospects, recent advancements and challenges of different wastewater streams for microalgal cultivation [J]. *J Environ Manage*, 2017, 203: 299 - 315.
- [12] YANG Z, PEI H, HOU Q, et al. Algal biofilm - assisted microbial fuel cell to enhance domestic wastewater treatment: nutrient, organics removal and bioenergy production[J]. *Chem Eng J*, 2018, 332: 277 - 285.
- [13] DANESHVAR E, ZARRINMEHR M J, HASHTJIN A M,

- et al. Versatile applications of freshwater and marine water microalgae in dairy wastewater treatment, lipid extraction and tetracycline biosorption[J]. *Bioresour Technol*, 2018, 268: 523 – 530.
- [14] MOLAZADEH M, DANESH S, AHMADZADEH H, et al. Influence of CO₂ concentration and N:P ratio on *Chlorella vulgaris* – assisted nutrient bioremediation, CO₂ biofixation and biomass production in a lagoon treatment plant[J]. *J Taiwan Inst Chem Eng*, 2019, 96: 114 – 120.
- [15] 姜红鹰, 周玉玲, 张桂敏, 等. 普通小球藻对养殖污水脱氮除磷的效果研究[J]. *生物资源*, 2017, 39(3): 204 – 210.
- [16] 李亚丽, 赵国强, 武双, 等. 基于废水培养微藻及微藻资源化利用的研究[J]. *现代化工*, 2021, 41(4): 48 – 51.
- [17] GUPTA S K, KUMAR M, GULDHE A, et al. Design and development of polyamine polymer for harvesting microalgae for biofuels production [J]. *Energ Convers Manage*, 2014, 85: 537 – 544.
- [18] DANQUAH M K, GLADMAN B, MOHEIMANI N, et al. Microalgal growth characteristics and subsequent influence on dewatering efficiency[J]. *Chem Eng J*, 2009, 151(1/2/3): 73 – 78.
- [19] JIANG L, LUO S, FAN X, et al. Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂ [J]. *Appl Energ*, 2011, 88(10): 3336 – 3341.
- [20] JIANG L, PEI H, HU W, et al. Biomass production and nutrient assimilation by a novel microalga, *Monoraphidium* sp. SDEC – 17, cultivated in a high – ammonia wastewater [J]. *Energ Convers Manage*, 2016, 123: 423 – 430.
- [21] DIANURSANTI, RIZKYTATA B T, GUMELAR M T, et al. Industrial tofu wastewater as a cultivation medium of microalgae *Chlorella vulgaris*[J]. *Energ Procedia*, 2014, 47(1): 56 – 61.
- [22] GULDHE A, ANSARI F A, SINGH P, et al. Heterotrophic cultivation of microalgae using aquaculture wastewater: a biorefinery concept for biomass production and nutrient remediation[J]. *Ecol Eng*, 2017, 99: 47 – 53.
- [23] GOUR R S, GARLAPATI V K, KANT A. Effect of salinity stress on lipid accumulation in *Scenedesmus* sp. and *Chlorella* sp.: feasibility of stepwise culturing[J]. *Curr Microbiol*, 2020, 77(5): 779 – 785.
- [24] PEI H, JIANG L. Mixing seawater with a little wastewater to produce bioenergy from limnetic algae [J]. *Trends Biotechnol*, 2018, 36(5): 480 – 483.
- [25] 李春, 王胜威, 张磊, 等. 膜生物反应器中小球藻生物膜生长与代谢的光调控特性[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(2): 670 – 676.
- [26] 赵新亚, 徐哲, 杨志平, 等. 光生物反应器连续式培养海洋微藻优势研究[J]. *中国食品工业*, 2021(6): 94 – 95.
- [27] POSTEN C. Design principles of photo – bioreactors for cultivation of microalgae[J]. *Eng Life Sci*, 2010, 9(3): 165 – 177.
- [28] IASIMONE F, PANICO A, DE FELICE V, et al. Effect of light intensity and nutrients supply on microalgae cultivated in urban wastewater: biomass production, lipids accumulation and settleability characteristics [J]. *J Environ Manage*, 2018, 223: 1078 – 1085.
- [29] HAN W, JIN W B, DING W Q, et al. Effects of nutrient composition, lighting conditions, and metal ions on the growth and lipid yield of the high – lipid – yielding microalgae (*Chlorella pyrenoidosa*) cultivated in municipal wastewater [J/OL]. *J Environ Chem Eng*, 2021, 9(6): 106491 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106491>.
- [30] RANI S, OJHA C. *Chlorella sorokiniana* for integrated wastewater treatment, biomass accumulation and value – added product estimation under varying photoperiod regimes: a comparative study [J/OL]. *J Water Process Eng*, 2021, 39: 101889 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101889>.
- [31] CHEAH W Y, SHOW P L, YAP Y J, et al. Enhancing microalga *Chlorella sorokiniana* CY – 1 biomass and lipid production in palm oil mill effluent (POME) using novel – designed photobioreactor [J]. *Bioengineered*, 2020, 11(1): 61 – 69.
- [32] ZHANG L, CHEN L, WANG J, et al. Attached cultivation for improving the biomass productivity of *Spirulina platensis* [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 181(1): 136 – 142.
- [33] AHLUWALIA S S, GOYAL D. Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater [J]. *Bioresour Technol*, 2007, 98(12): 2243 – 2257.
- [34] HUANG Y, XIONG W, LIAO Q, et al. Comparison of *Chlorella vulgaris* biomass productivity cultivated in biofilm and suspension from the aspect of light transmission and microalgae affinity to carbon dioxide[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 222: 367 – 373.
- [35] WU X, CEN Q, MIN A, et al. A novel algal biofilm photobioreactor for efficient hog manure wastewater utilization and treatment [J/OL]. *Bioresour Technol*, 2019, 292: 121925 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121925>.
- [36] 王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 等. 生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果[J]. *环境科学*, 2017, 38(8): 3354 – 3361.
- [37] 李安. 垂直微藻生物膜系统的构建及其在工业废水处理中的应用[D]. 合肥:安徽大学, 2021.

- [38] FOUILLAND E. Biodiversity as a tool for waste phycoremediation and biomass production [J]. *Rev Environ Sci Bio/Technol*, 2012, 11(1): 1–4.
- [39] 陈星宇. 藻菌共培养体系处理污水及产油耦合的初步研究[D]. 天津:天津大学, 2019.
- [40] ZHANG B, LENS P N L, SHI W, et al. Enhancement of aerobic granulation and nutrient removal by an algal – bacterial consortium in a lab – scale photobioreactor[J]. *Chem Eng J*, 2018, 334: 2373–2382.
- [41] MANDAL S K, SINGH R P, PATEL V. Isolation and characterization of exopolysaccharide secreted by a toxic dinoflagellate, *Amphidinium carterae* Hulburt 1957 and its probable role in harmful algal blooms (HABs) [J]. *Microb Ecol*, 2011, 62(3): 518–527.
- [42] SUBASHCHANDRABOSE S R, RAMAKRISHNAN B, MEGHARAJ M, et al. Consortia of cyanobacteria/microalgae and bacteria: biotechnological potential [J]. *Biotechnol Adv*, 2011, 29(6): 896–907.
- [43] DAO G H, WU G X, WANG X X, et al. Enhanced microalgae growth through stimulated secretion of indole acetic acid by symbiotic bacteria[J]. *Algal Res*, 2018, 33: 345–351.
- [44] KUMSIRI B, PEKKOH J, PATHOM – AREE W, et al. Enhanced production of microalgal biomass and lipid as an environmentally friendly biodiesel feedstock through actinomycete co – culture in biogas digestate effluent [J/OL]. *Bioresour Technol*, 2021, 337: 125446 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125446>.
- [45] 张波, 陈佳琛, 崔梦瑶, 等. 藻菌共生体系的建立及其对造纸废水的处理效果[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(3): 1211–1216.
- [46] LEONG W H, LIM J W, JULAM M K, et al. Co – cultivation of activated sludge and microalgae for the simultaneous enhancements of nitrogen – rich wastewater bioremediation and lipid production [J]. *J Taiwan Inst Chem Eng*, 2018, 87: 216–224.
- [47] YADAV G, SHARMA I, GHANGREKAR M, et al. A live bio – cathode to enhance power output steered by bacteria – microalgae synergistic metabolism in microbial fuel cell [J/OL]. *J Power Sources*, 2019, 449: 227560 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227560>.
- [48] NOOKWAM K, CHEIRSILP B, MANEECHOTE W, et al. Microbial fuel cells with photosynthetic – cathodic chamber in vertical cascade for integrated bioelectricity, biodiesel feedstock production and wastewater treatment [J/OL]. *Bioresour Technol*, 2022, 346: 126559 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126559>.
- [49] CHRISTWARDANA M, HADIYANTO H, MOTTO S A, et al. Performance evaluation of yeast – assisted microalgal microbial fuel cells on bioremediation of cafeteria wastewater for electricity generation and microalgae biomass production [J/OL]. *Biomass Bioenerg*, 2020, 139: 105617 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105617>.
- [50] HOU Q, CHENG J, NIE C, et al. Features of *Golenkinia* sp. and microbial fuel cells used for the treatment of anaerobically digested effluent from kitchen waste at different dilutions [J]. *Bioresour Technol*, 2017, 240: 130–136.
- [51] LI M, ZHOU M, LUO J, et al. Carbon dioxide sequestration accompanied by bioenergy generation using a bubbling – type photosynthetic algae microbial fuel cell [J]. *Bioresour Technol*, 2019, 280: 95–103.
- [52] BANSAL A, SHINDE O, SARKAR S. Industrial wastewater treatment using phycoremediation technologies and co – production of value – added products [J/OL]. *J Bioremediat Biodegrad*, 2018, 9(1): 1000428 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000428>.
- [53] ENAMALA M K, DIXIT R, TANGELLAPALLY A, et al. Photosynthetic microorganisms (algae) mediated bioelectricity generation in microbial fuel cell: concise review [J/OL]. *Environ Technol Innov*, 2020, 19: 100959 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100959>.
- [54] NAYAK J K, GHOSH U K. Post treatment of microalgae treated pharmaceutical wastewater in photosynthetic microbial fuel cell (PMFC) and biodiesel production [J/OL]. *Biomass Bioenerg*, 2019, 131: 105415 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105415>.
- [55] YANG Z, ZHANG L, NIE C, et al. Multiple anodic chambers sharing an algal raceway pond to establish a photosynthetic microbial fuel cell stack: voltage boosting accompany wastewater treatment [J/OL]. *Water Res*, 2019, 164: 114955 [2022 – 01 – 25]. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114955>.
- [56] SALAMA E S, KABRA A N, JI M K, et al. Enhancement of microalgae growth and fatty acid content under the influence of phytohormones [J]. *Bioresour Technol*, 2014, 172: 97–103.
- [57] JUSOH M, LOH S H, CHUAH T S, et al. Elucidating the role of jasmonic acid in oil accumulation, fatty acid composition and gene expression in *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae) during early stationary growth phase [J]. *Algal Res*, 2015, 9: 14–20.

- 2011, 25(3):315–324.
- [18] GUIMARÃES DRUMMOND E SILVA F, MIRALLES B, HERNÁNDEZ-LEDESMA B, et al. Influence of protein-phenolic complex on the antioxidant capacity of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) products [J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(4):800–809.
- [19] KOTECKA-MAJCHRZAK K, SUMARA A, FORMAL E, et al. Oilseed proteins – properties and application as a food ingredient [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 106:160–170.
- [20] YAN C, ZHOU Z. Walnut pellicle phenolics greatly influence the extraction and structural properties of walnut protein isolates [J/OL]. *Food Res Int*, 2021, 141:110163 [2022-03-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110163>.
- [21] REGUEIRO J, SÁNCHEZ-GONZÁLEZ C, VALLVERDÚ-QUERALT A, et al. Comprehensive identification of walnut polyphenols by liquid chromatography coupled to linear ion trap-orbitrap mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2014, 152:340–348.
- [22] DAY L. Proteins from land plants – potential resources for human nutrition and food security [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2013, 32(1):25–42.
- [23] DAI T, CHEN J, MCCLEMENTS D J, et al. Protein-polyphenol interactions enhance the antioxidant capacity of phenolics: analysis of rice glutelin-procyanidin dimer interactions [J]. *Food Funct*, 2019, 10(2):765–774.
- [24] ALU'DATT M H, RABABAH T, ALHAMAD M N, et al. Occurrence, types, properties and interactions of phenolic compounds with other food constituents in oil-bearing plants [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2018, 58(18):3209–3218.
- [25] ZOU Y, WU C, MA C, et al. Interactions of grape seed procyanidins with soy protein isolate: contributing antioxidant and stability properties [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2019, 115:108465 [2022-03-05]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108465>.
- [26] MAO X, HUA Y. Chemical composition, molecular weight distribution, secondary structure and effect of NaCl on functional properties of walnut (*Juglans regia* L.) protein isolates and concentrates [J]. *J Food Sci Technol*, 2014, 51(8):1473–1482.
- [27] SUI X, SUN H, QI B, et al. Functional and conformational changes to soy proteins accompanying anthocyanins: focus on covalent and non-covalent interactions [J]. *Food Chem*, 2018, 245:871–878.
- [28] ZHOU S, LIN Y, XU X, et al. Effect of non-covalent and covalent complexation of (–)-epigallocatechin gallate with soybean protein isolate on protein structure and in vitro digestion characteristics [J/OL]. *Food Chem*, 2020, 309:125718 [2022-03-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125718>.
- [29] KANAKIS C D, HASNI I, BOURASSA P, et al. Milk β -lactoglobulin complexes with tea polyphenols [J]. *Food Chem*, 2011, 127(3):1046–1055.
-
- (上接第 111 页)
- [58] SARABI V, ARJMAND-GHAJUR E. Exogenous plant growth regulators/plant growth promoting bacteria roles in mitigating water-deficit stress on chicory (*Cichorium pumilum* Jacq.) at a physiological level [J/OL]. *Agric Water Manage*, 2021, 245:106439 [2022-01-25]. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106439>.
- [59] YOON A, OH H E, KIM S Y, et al. Plant growth regulators and rooting substrates affect growth and development of *Salix koriyanagi* cuttings [J/OL]. *Rhizosphere*, 2021, 20:100437 [2022-01-25]. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100437>.
- [60] ZHAO P, WANG Y, LIN Z, et al. The alleviative effect of exogenous phytohormones on the growth, physiology and gene expression of *Tetraselmis cordiformis* under high ammonia-nitrogen stress [J]. *Bioresour Technol*, 2019, 282:339–347.
- [61] LIU T, LUO F, WANG Z, et al. The enhanced biomass and lipid accumulation in *Coccomyxa subellipsoidea* with an integrated treatment strategy initiated by brewery effluent and phytohormones [J/OL]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2018, 34(2):25 [2021-01-25]. <https://doi.org/10.1007/s11274-018-2408-9>.
- [62] DONG X, ZHAO Y, LI T, et al. Enhancement of lipid production and nutrient removal of *Monoraphidium* sp. FXY-10 by combined melatonin and molasses wastewater treatment [J]. *J Taiwan Inst Chem Eng*, 2019, 99:123–131.
- [63] QIAO T, ZHAO Y, HAN B, et al. Myo-inositol promotes lipid production and nutrients removal by microalga under molasses wastewater [J]. *Renew Energ*, 2021, 172:327–335.