

安浩, 吴鑫明, 操家顺, 等. 菌藻共生系统污水处理及 CO₂ 固定作用机制的研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(3):39-46.

AN H, WU X M, CAO J S, et al. Research progress on mechanism of bacterial-algal system for wastewater treatment and CO₂ fixation[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(3):39-46.

菌藻共生系统污水处理及 CO₂ 固定作用机制的研究进展

安浩¹, 吴鑫明^{2,3}, 操家顺^{2,3}, 李超^{2,3,*}, 刘伟京⁴

(1. 中国五冶集团有限公司, 四川成都 610000; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 3. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 4. 江苏省环境科学研究院, 江苏南京 210036)

摘要 目前水生态环境污染严重, 现有水处理工艺存在能耗高、温室气体排放等问题。菌藻共生技术是一种能同步处理污水和固定 CO₂ 的绿色处理技术。文章综述了菌藻共生体系提高减污固碳效率的作用效能及作用机制, 详细阐述了菌藻共生体系降解氮磷污染物及固定 CO₂ 的作用机理: 微藻通过同化作用实现对氮磷的吸收, 并通过光合自养、异养、兼养 3 种固碳过程实现 CO₂ 的固定; 细菌通过硝化作用和反硝化作用脱氮, 利用聚磷菌强化除磷, 通过促进碳酸酐酶的产生来提高藻细胞的固碳效率。总结了菌藻共生体系实际应用中的现存问题, 并对未来的研究方向进行了展望, 为今后菌藻共生体系的进一步应用提供了理论支持。

关键词 菌藻共生 污水处理 CO₂ 固定 作用机制 减污降碳

中图分类号: X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 1009-0177(2024)03-0039-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.03.005

Research Progress on Mechanism of Bacterial-Algal System for Wastewater Treatment and CO₂ Fixation

AN Hao¹, WU Xinming^{2,3}, CAO Jiashun^{2,3}, LI Chao^{2,3,*}, LIU Weijing⁴

(1. China MCC5 Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

Abstract Currently, the water ecosystem is seriously polluted, and the existing water treatment process has problems of high energy consumption and greenhouse gas emissions. Bacterial-algal system is a green treatment technology that can treat wastewater and fix CO₂ simultaneously. The effectiveness and mechanism of the bacteria-algae system to improve the efficiency of pollution reduction and carbon fixation are reviewed. And the mechanism of the bacteria-algae system to degrade nitrogen and phosphorus and fix CO₂ is elaborated, microalgae absorbed nitrogen and phosphorus through assimilation, and fixed CO₂ through photosynthetic autotrophic, heterotrophic and parthenogenic processes. Bacteria removes nitrogen through nitrification and denitrification, and uses phosphorus-polymerizing bacteria to strengthen phosphorus removal. The carbon fixation efficiency of algal is improved by promoting the production of carbonic anhydrase. The existing problems in the practical application of the bacterial-algal system are summarized, and the future research directions are prospected, which provide theoretical support for the further application of bacterial-algal system.

Keywords bacterial-algal system wastewater treatment CO₂ fixation mechanism pollution and carbon emission reduction

[收稿日期] 2023-02-07

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51878243); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022861)

[作者简介] 安浩(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为水污染控制及资源化, E-mail: ahsky0523@126.com。

[通信作者] 李超(1984—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为水污染控制及资源化, E-mail: lichao0609@163.com。

近年来,随着人类生产及生活活动的增加,工农业废水及生活污水大量排放,严重污染了水生态环境,极易引起水体富营养化^[1]。目前,许多生物处理技术已经被广泛应用到了市政污水的处理中,包括传统活性污泥(CAS)技术^[2]、人工湿地技术^[3]、植物修复技术^[4]、生物膜技术^[5]和微生物燃料电池技术^[6]等。此外,高级氧化技术也可实现对有机物和氮磷的高效去除^[7]。虽然这些工艺取得了良好的污染物去除效果,但它们仍存在能源消耗大和温室气体(例如:CO₂、CH₄)排放等缺点,不满足当前低碳发展的要求。因此,开发既能实现污水处理同时又能减少温室气体排放的处理技术迫在眉睫。

菌藻共生技术作为一种能实现同步处理污水和固定 CO₂ 的绿色处理技术引起了越来越多的关注^[8]。细菌和微藻通过二者间的相互作用和协同增效来提高污水处理过程中的污染物去除率(图1)。微藻能有效同化 CO₂ 同时产生 O₂ 来代替外部曝气,而 O₂ 又被细菌用来氧化有机物产生 CO₂。在这个过程中,光作为菌藻系统处理废水的能量来源,可以减少曝气电能消耗,并且光合作用吸收 CO₂ 可以减少温室气体排放^[9]。微藻吸收污水中氮磷等污染物并将其转化为生物质,细菌自身代谢产生信号分子、微量元素和无机碳源等供微藻生长。微藻被证明可以和硝化细菌的相互作用来改变氮转化效率^[10-11],并影响磷酸盐吸收的微生物群落丰度^[12]。作为一种绿色工艺,菌藻共生技术为未来的城市污水处理实现“碳达峰”和“碳中和”目标提供了可能。然而,目前研究都集中在菌藻共生系统处理废水和固定 CO₂ 的菌种和藻种筛选上,重点关注菌藻共生系统对污染物的去除效率和 CO₂ 的固定效率: Xu 等^[13]研究了微藻与内生细菌(S395-2)共生系统净化沼气,当菌藻比例为 10:1 时取得最佳净化效果, COD、氮、磷和 CO₂ 的去除效率分别为 88.29% ± 5.03%、88.31% ± 4.29%、88.21% ± 4.51% 和 68.13% ± 1.69%。这忽略了细菌和微藻在处理废水和固定 CO₂ 过程中二者相互作用机理的研究。

本文综述了菌藻共生系统在减污固碳过程中的作用效能,并从脱氮除磷以及 CO₂ 固定的角度阐述了菌藻共生系统的相互作用机制,最后对菌藻共生体系实际应用中的现存问题进行了总结,并对未来的研究方向提出了建议,为今后菌藻共生体系的工

程应用提供了理论支持。

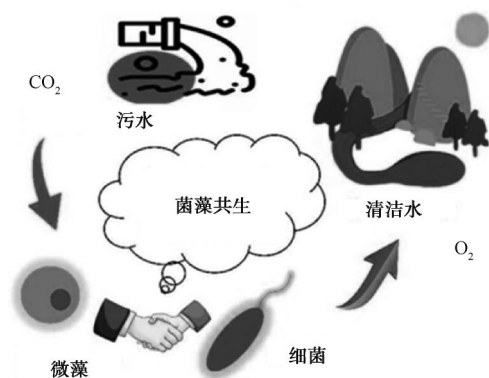


图1 菌藻共生系统净水固碳作用

Fig. 1 Effect of Bacterial-Algal System on Water Purification and Carbon Fixation

1 菌藻共生系统去除氮

1.1 菌藻共生系统去除氨氮

菌藻共生系统中氨氮降解主要通过以下3种途径:氨氮被氧化为亚硝态氮(NO₂⁻-N)和硝态氮(NO₃⁻-N);微藻和细菌将氨氮吸收同化为自身生物质;在强碱性环境中氨氮以氨气的形式挥发^[14]。菌藻共生系统脱氮的机理如图2所示。

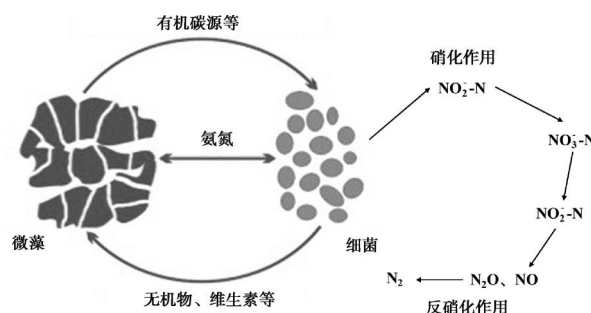


图2 菌藻共生系统脱氮机理

Fig. 2 Nitrogen Removal Mechanism of Bacteria-Algae System

硝化细菌在好氧条件下发生硝化反应,将氨氮转化为 NO₂⁻-N,进一步氧化为 NO₃⁻-N。菌藻共生系统中微藻通过光合作用为硝化细菌提供 O₂ 和有机碳源,细菌代谢产生的 CO₂ 和无机物、维生素等反过来可以促进微藻生长^[15]。向硝化菌群中投加微藻可以增加硝化反应进行的程度,提高对氨氮的去除率。Wang 等^[11]的研究表明,菌藻共生系统中微藻利用光合作用可以为硝化反应提供所需溶解氧(DO)的 74%,且当 DO 的质量浓度高于 0.5 mg/L 时,氨氮的去除率超过 76%,大大加速硝化反应进

程。此外, Bankston 等^[12]的研究也表明: 小球藻和活性污泥共同培养状态下, 硝酸盐的产量比活性污泥单独作用时提高了 2.7 倍, 并且在其培养基中没有观察到亚硝酸盐, 表明该硝化作用将氨氮彻底氧化为 NO_3^- -N。此外, 菌藻共生系统产生的胞外聚合物(EPS)具有一定厚度, 可以减轻强光照对菌藻共生系统细胞活性的抑制作用。在强光的连续照射下, 氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的活性都将受到一定程度的抑制。Hooper 等^[16]研究发现, 强光主要通过诱导高氧化活性物质的形成, 损坏细菌细胞结构, 并通过抑制氨单加氧酶和细胞色素 C 的活性来降低氨氧化细菌和硝化细菌的活性。光照强度从菌藻共生系统产生 EPS 的表层至内层衰减, 防止过高的光照强度对细胞结构与活性产生负面影响, 有利于氨氮的转化去除。

硝化作用并不是菌藻共生系统中去除氨氮的唯一途径。微藻和部分异养细菌将氨氮作为营养物质吸收, 然后将其同化为细胞组分, 从而实现水中氨氮的去除。氨氮通过微藻细胞内产生的转运器转运到微藻细胞中, 在谷氨酰胺合成酶和谷氨酸脱氢酶等酶的作用下, 氨氮可以很容易地被同化为氨基酸, 成为微藻生物物质的一部分^[17]。Bankston 等^[12]发现, 通过微藻同化作用去除的氨氮几乎是硝化作用去除的 2 倍。细菌可以促进微藻生物物质吸收同化较高浓度的氨氮。Bankston 等^[8]发现, 投加活性污泥后的菌藻共生系统与微藻单独作用时相比, 既可以促进微藻对氨氮的同化吸收, 还能使微藻保持较高的生长速率。

水中氨氮浓度是影响菌藻间作用关系的重要参数。在低氨氮浓度下, 由于缺乏氨氮, 微藻和硝化细菌之间为竞争关系, 二者相互释放具有抑制作用的物质(例如藻毒素、植物激素等), 对微藻和细菌间关系产生负面影响^[18]。Choi 等^[19]在一项研究中发现, 当水中氨氮含量不足, 微藻的存在抑制了菌群 77% 的硝化作用。当氨氮浓度高时, 可供硝化细菌反应和微藻同化的氮源充足, 微藻和硝化细菌之间是互利共生关系。Su 等^[20]发现, 在氨氮含量充足的条件下, 小球藻和细菌共同培养与藻类、细菌分别单独培养相比, 氨氮的去除率明显提高。

1.2 菌藻共生系统去除硝态氮

菌藻共生系统中, NO_3^- -N 主要依靠细菌的反硝

化作用以及微藻的同化作用降解。微藻细胞内的氮元素含量占细胞重量的 5%~10%, 微藻细胞通过同化作用吸收硝酸盐作为细胞生长的氮源^[21]。虽然微藻可以同化 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N, 但微藻细胞首选氨氮作为氮源, 因为氨氮可以很容易被同化为氨基酸。为了同化 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N, 微藻需要利用硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶将 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 还原成氨氮, 最终氨氮被转运到微藻细胞中利用^[17]。在此过程中, 微藻需要消耗硝酸盐和碳源, 且光合作用为该反应过程提供能量^[22]。反硝化作用是在缺氧条件下, 硝酸盐作为有机物和无机物氧化的最终电子受体, 将 NO_3^- -N 最终还原成 N_2 , 从而实现污水中 NO_3^- -N 的去除^[17]。在硝酸盐还原酶的催化作用下, 兼性细菌将 NO_3^- -N 还原为 NO_2^- -N; 然后在亚硝酸盐还原酶的催化作用下, NO_2^- -N 被还原成 NO 和 N_2O ; 最后, 在 N_2O 还原酶的催化作用下, 将 N_2O 转化为 N_2 ^[23]。

反硝化过程主要发生在缺氧条件下, 但在菌藻共生系统中, 微藻通过光合作用产生 O_2 会抑制反硝化过程相关酶的活性, 进而影响反硝化进程^[20]。Petrovič 等^[24]发现, 菌藻共生系统中反硝化过程的反应速率低于反硝化细菌单独作用时的反应速率。此外, 在菌藻共生系统中, 夜间藻类呼吸会消耗大量的 DO^[25], 从而进一步强化了反硝化过程所需的厌氧环境。白天微藻通过光合作用制造 O_2 提高 DO 含量, 有助于硝化作用的发生; 黑暗条件下微藻通过呼吸代谢进一步消耗 DO, 为反硝化作用创造了良好的缺氧环境。废水中有机碳源的存在有助于黑暗条件下微藻和细菌呼吸代谢进一步消耗废水中 DO, 为反硝化过程构建缺氧环境。Rezvani 等^[26]证明, 菌藻共生体系中微藻可以利用光照期间产生的 O_2 , 在黑暗条件下降解废水中有机物。

菌藻间的协同作用可以实现二者代谢产物的交换, 以满足二者各自的营养需求^[27]。例如, 微藻光合作用产生的有机物可以为低有机负荷废水中的细菌提供有机碳源, 细菌反过来可以通过自身代谢活动降解微藻产生的有机物, 抑制废水中 COD 含量的增长^[28]。另外, 某些微藻可以为自养反硝化细菌在硝酸盐还原过程中提供其所需的氢气。微藻黑暗条件下产生氢气, 为反硝化的进行提供物质保障; 在白天, 微藻通过光合作用重建碳储备, 为后期氢气的产生提供动力。Rezvani 等^[29]比较了耗氢脱硝器

(HCD)-菌藻共生系统与 HCD-单独细菌作用下的硝酸盐去除效率,在不注入外部氢气的情况下, HCD-菌藻共生系统具有更高的硝酸盐去除率。菌藻间可以通过群体感应(QS)信号分子实现胞间通讯,从而调节各种生命活动与代谢过程。Ji 等^[30]研究发现,地衣芽孢杆菌产生的一种信号分子 AIP 可被 QS 受体感知,细菌细胞内的 c-di-GMP 受体接收并放大信号,诱导细菌产生某些物质,刺激普通小球藻细胞中叶绿素代谢相关基因的表达。结果发现,共生系统中的叶绿素 a 浓度随着干细胞重量的显著增加而增加。当初始菌藻比例为 3:1 时,共生系统的相互作用和协同效应最为明显,COD、TP、TN 的去除率分别为 86.55%、80.28%、88.95%,此时 c-di-GMP 的质量分数达到了 3.85 μg/g, AIP 的质量浓度达到了 2.81 mg/L。

2 菌藻共生系统去除磷

可溶性磷(H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-})是磷在废水中的最常见形式^[31],菌藻共生系统中,可溶性磷主要依靠聚磷菌的厌氧释磷、好氧过量吸磷过程以及微藻的同化作用去除,菌藻共生系统除磷的机理如图 3 所示。

聚磷菌是污水处理厂中起主要作用的除磷菌^[32]。聚磷菌在厌氧-好氧交替条件下将废水中吸收的正磷酸盐以多磷酸盐的形式储存在细胞内^[33],在厌氧条件下,聚磷菌利用聚磷酸盐水解产生的能量吸收废水中的碳源,并以聚羟基烷酸(PHAs)和聚羟基丁酸(PHBs)的形式储存在细胞内,同时水解产生的正磷酸盐释放到水中。在好氧条件下,聚磷菌利用细胞内的 PHAs 和 PHBs 为碳源,过量吸收废水中的正磷酸盐合成聚磷酸盐储存在细胞内,将废水中的磷转移到聚磷菌体内。最终,聚磷菌体内的聚磷酸盐随着剩余污泥的排放而去除^[34-35]。微藻可以与聚磷菌相互作用,促进对磷的去除,甚至微藻可以直接吸收积累聚磷酸盐^[36]。Ji 等^[37]研究了非曝气菌藻颗粒污泥工艺中磷的去除,结果表明,进水中近 86%的磷酸盐在 6 h 内被去除,其中包括在黑暗条件下反应 2 h 和光照条件下反应 4 h,观察到菌藻颗粒污泥在黑暗阶段有少量的磷释放,在光照条件下废水中的聚磷酸盐被大量吸收。

微藻还可以通过同化作用从废水中去除磷酸盐。正磷酸盐被吸附在细胞表面^[38],然后被运送进

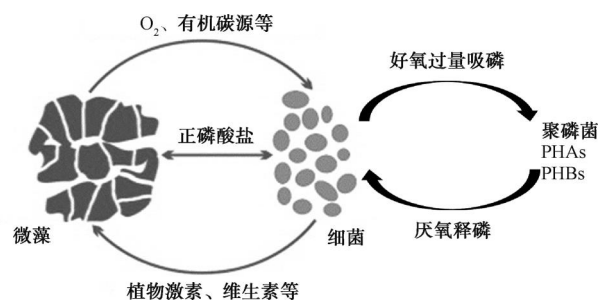


图 3 菌藻共生系统除磷机理

Fig. 3 Phosphorus Removal Mechanism of Bacteria-Algae System

细胞内同化与供细胞生长^[39]。根据 Rezvani 等^[29]的一项研究,微藻对磷酸盐的同化是菌藻共生系统中磷酸盐去除的主要机制。磷是微藻光合作用所需的重要元素,其平均含量占微藻干重的 1%^[18],磷的缺乏会降低光合作用卡尔文循环中底物的合成和再生速率,从而抑制微藻光合作用的进行^[18]。菌藻共生系统是提高除磷效率的一种可持续方法。Rezvani 等^[29]表明,与单一微藻[4.5 mg/(L·d)]和细菌[2.6 mg/(L·d)]除磷效率相比,菌藻共生系统[6.34 mg/(L·d)]拥有更高的磷酸盐去除率。菌藻共生系统的同化率主要由藻类生长率决定,并且细菌的存在可以促进微藻的生长。细菌可以通过提供维生素^[40]和植物激素^[41](例如,生长素和发光色素)来促进微藻的生长。细菌提供的维生素等辅助因子已被证明可以改善藻类生长和废水养分吸收^[40],例如,生长素可以促进植物和微藻细胞生长^[42],同时抑制氧化应激反应^[43]。此外, Liu 等^[44]在研究菌-藻生物膜 EPS 时发现,由于菌-藻生物膜表面含有蛋白质和多聚糖等组分,其具有丰富的含氧官能团,有机磷可以与 EPS 发生配位作用结合,通过剩余污泥沉淀去除。

3 菌藻共生系统固定 CO₂

微藻具有从空气中固定 CO₂ 的能力,并将 CO₂ 作为无机碳源供其生长和代谢^[45]。据报道,每生产 1 t 微藻类生物质可以固定 1.83 t CO₂,其固碳效率是陆生植物的 10~15 倍^[46]。表 1 总结了不同种类的菌藻共生系统减污降碳性能。

微藻有 3 种固碳模式,分别为光合自养固碳、异养固碳和兼养固碳^[17]。光合自养固碳是指微藻通过光合作用,在叶绿素或其他光合色素的作用下将 CO₂ 和 H₂O 转化为三磷酸腺苷(ATP)和还原型烟

表 1 不同种类的菌藻共生系统减污降碳性能

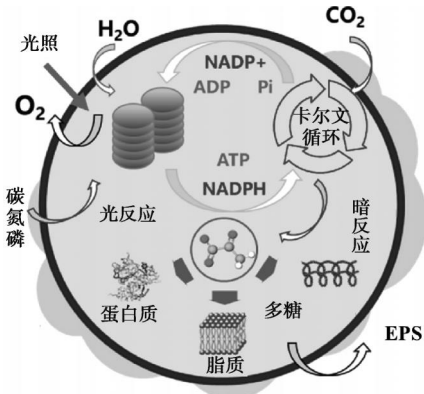
Tab. 1 Pollution and Carbon Emission Reduction Performance of Different Species of Bacterial-Algal Symbiotic Systems

微藻种类	细菌种类	处理类型	CO ₂ 固定情况	水质去除率	文献
海绵绿藻属(<i>Spongiochloris</i> sp.)	突尼斯北部石化工业废水中的细菌	石油废水	2 920.5 mg/L	总碳氢化合物去除 99.18%	[47]
蛋白核小球藻(<i>Chlorella pyrenoidosa</i> FACHB-9)	上海曲阳污水厂中的活性污泥	市政污水及垃圾渗滤液	65.8 mg/L	TP 去除率为 95% 以上 氨氮去除率为 95% 以上 TN 去除率为 90% 以上	[48]
小球藻(<i>Chlorella</i> sp.) 盘星藻属(<i>Pediastrum</i> sp.) 硅藻(<i>Phormidium</i> sp.)	好氧颗粒污泥	市政污水	48%±7%	TN 质量浓度<15 mg/L, TP 质量浓度<2 mg/L	[49]
斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>)	模拟市政污水中的细菌	城市污水厂二级出水	32.49%±2.53%	TP 去除率为 95.6% TOC 去除率为 59.1% TN 去除率为 97.8%	[50]

酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)等光反应产物的过程^[51],微藻细胞光合作用固碳机理如图 4 所示。微藻细胞中的光合作用分光反应和暗反应两个阶段进行。光反应由光驱动,利用光能将烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADP⁺)和二磷酸腺苷(ADP)转化为储存能量的 NADPH 和 ATP。暗反应不需光参与,且与光反应同时发生,微藻细胞利用光反应过程中产生的 NADPH 和 ATP 固定大气中 CO₂。暗反应中,微藻通过卡尔文循环的羧化、还原和再生三个阶段来实现 CO₂ 捕获。羧化阶段,在核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶(RuBisCo)的催化作用下,CO₂ 与核酮糖-1,5-二磷酸(RuBP)结合生成 3-磷酸甘油酯(3-PGA),从而实现 CO₂ 固定。还原阶段,在 3-磷酸甘油酯激酶的催化下,3-PGA 被 ATP 磷酸化形成 1,3-二磷酸甘油酯;然后在甘油醛磷酸脱氢酶的催化下,1,3-二磷酸甘油酯被 NADPH 还原生成 3-磷酸甘油醛(G-3-P)。在最后的再生阶段,G-3-P 经过一系列反应生成核酮糖-5-磷酸,在核酮糖磷酸激酶的作用下生产 RuBP,重新进入羧化阶段,开启下一个卡尔文循环^[51-52]。微藻异养固碳是指在没有外加无机碳源条件下,以有机碳作为电子供体,微藻通过光合自养生长过程将自身呼吸代谢产生的所有 CO₂ 全部吸收^[53]。微藻兼养固碳时,藻细胞会优先进行光自养过程^[53],通过光自养途径产生的 O₂ 不断积累,在微藻细胞内形成高浓度 DO 环境时促进微藻的异养过程的发生。

在水体中微藻光合固碳受制于两大因素:
(1)卡尔文循环中 RuBisCO 对 CO₂ 的亲合力低;
(2)CO₂ 必须穿过气液界面扩散到水中,在水中的

扩散速率远慢于空气,导致水中 CO₂ 的供应量小^[54]。在水中微藻固定的无机碳源为 CO₂ 和 HCO₃⁻,当外界 CO₂ 的供应受限制时,藻细胞产生的碳酸酐酶(CA)可催化水中的 HCO₃⁻ 快速转化为 CO₂^[55]。在菌藻共生系统中,菌群通过促进 CA 的产生进而促进藻细胞生长。邓洁等^[56]在铜绿微囊藻样品中分离出产 CA 的附生细菌,CA 附生菌加入铜绿微囊藻中共同培养,构建 CA 附生菌-铜绿微囊藻共生系统,试验结果表明,菌藻共生系统对 CA 附生菌-铜绿微囊藻的生长和 CO₂ 的捕获均有促进作用。另外,提高 RuBisCO 羧化酶的活性也可以增强光合碳固定。Lin 等^[57]证明了 *pdxY* 基因成功介导了 CC-400 中的 CO₂ 利用,与野生型(1.442 g/L)相比,具有 *pdxY* 基因的莱茵衣藻获得了两倍高的生物量,每克微藻细胞实现了 1.183 g CO₂ 固定。



注:P_i为游离的磷酸基团。

图 4 微藻细胞光合作用固碳机理^[51]

Fig. 4 Photosynthetic Carbon Fixation Mechanism of Microalgae Cells^[51]

4 结论与展望

针对水生态环境污染严重、现有水处理工艺能耗高、温室气体大量排放等问题,菌藻共生系统为去除废水中氮磷污染物以及减少温室气体排放提供了一种绿色可持续的解决方案。文章综述了菌藻共生体系提高减污固碳的作用效能及作用机制,微藻可为硝化细菌提供 O₂ 促进对氨氮的转化,菌藻共生系统生成的 EPS 能够减轻强光照对菌藻共生系统细胞活性的抑制作用,保证氨氮相关转化菌的活性。夜间藻类呼吸会消耗大量的 DO 有利于营造缺氧环境,有助于反硝化作用的进行。微藻对磷酸盐的同化是菌藻共生系统中磷酸盐去除的主要机制,细菌通过提供维生素和植物激素来促进微藻生长,从而有助于磷的去除。微藻利用光合作用通过光反应和暗反应两个阶段来实现 CO₂ 固定,提高 CA 和 RuBisCO 羧化酶的活性可以提高微藻固定 CO₂ 的效率。菌藻共生系统在降解水中氮磷污染物及 CO₂ 固定上展现出广阔的应用前景。

目前,菌藻共生系统在减污降碳领域的研究仍处于起步阶段,菌藻共生系统的规模化应用及微藻生物燃料的资源化回收面临一些障碍。笔者认为未来菌藻共生系统在减污降碳领域的发展可能主要分为以下几个方向:(1)高效减污降碳菌藻的筛选,各种现有菌藻之间按照不同物质、比例、方式、条件进行复合,调配出高性能减污降碳的菌藻共生系统;(2)开发附着生长的菌藻生物膜系统,使其易于从水中分离沉降、结构稳定,并实现规模化应用;(3)新型菌藻共生催化剂的开发,随着化工和材料科学的发展,越来越多的人工和天然材料作为菌藻共生系统高效减污降碳的催化剂供人们研究开发。总之,构建高效可靠的菌藻共生系统,降低实际运行维护及回收成本,将进一步加速菌藻共生系统在去除污水中氮磷污染物和固定 CO₂ 领域的实际应用。

参考文献

- [1] DALU T, WASSERMAN R J, MAGORO M L, et al. River nutrient water and sediment measurements inform on nutrient retention, with implications for eutrophication [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 684: 296–302. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.167.
- [2] MAIGUAL-ENRIQUEZ Y A, MAIA A A D, GUERRERO-ROMERO C L, et al. Comparison of sludges produced from two different recirculating aquaculture systems (RAS) for recycle and disposal [J]. *Aquaculture*, 2019, 502: 87–96. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.11.060.
- [3] ZHAO Z M, ZHANG X, WANG Z F, et al. Enhancing the pollutant removal performance and biological mechanisms by adding ferrous ions into aquaculture wastewater in constructed wetland [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122003. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122003.
- [4] PANT D, ADHOLEYA A. Nitrogen removal from biometanated spentwash using hydroponic treatment followed by fungal decolorization [J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, 26(3): 559–565.
- [5] 廖怀玉, 孙丽, 李济斌, 等. 菌-藻共生生物膜污水处理研究进展[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(4): 141–153.
LIAO H Y, SUN L, LI J B, et al. Bacterial-algal symbiosis biofilm for wastewater treatment: A review [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(4): 141–153.
- [6] LITTFINSKI T, BECKMANN J, GEHRING T, et al. Model-based identification of biological and pH gradient driven removal pathways of total ammonia nitrogen in single-chamber microbial fuel cells [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133987. DOI: 10.1016/j.cej.2021.133987.
- [7] LANG Z C, ZHOU M H, ZHANG Q Z, et al. Comprehensive treatment of marine aquaculture wastewater by a cost-effective flow-through electro-oxidation process [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 722: 137812. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137812.
- [8] BANKSTON E M, HIGGINS B T. Anaerobic microbial communities can influence algal growth and nutrient removal from anaerobic digestate [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122445. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122445.
- [9] 毛炜炜, 张磊, 尹庆蓉, 等. 微藻固碳光合作用强化策略及展望[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(9): 30–43.
MAO W W, ZHANG L, YIN Q R, et al. Strategies and prospect of photosynthesis mechanism intensification of microalgae CO₂ fixation [J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(9): 30–43.
- [10] SEPEHRI A, SARRAFZADEH M H, AVATEFFAZELI M. Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying-enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119164.
- [11] WANG M, YANG H, ERGAS S J, et al. A novel shortcut nitrogen removal process using an algal-bacterial consortium in a photo-sequencing batch reactor (PSBR) [J]. *Water Research*, 2015, 87: 38–48. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.016.
- [12] BANKSTON E, WANG Q C, HIGGINS B T. Algae support populations of heterotrophic, nitrifying, and phosphate-accumulating bacteria in the treatment of poultry litter anaerobic digestate [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 398:

125550. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125550.
- [13] XU M, XUE Z X, SUN S Q, et al. Co-culturing microalgae with endophytic bacteria increases nutrient removal efficiency for biogas purification [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 314: 123766. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123766.
- [14] GODOS I D, ARBIB Z, LARA E, et al. Evaluation of high rate algae ponds for treatment of anaerobically digested wastewater: Effect of CO₂ addition and modification of dilution rate [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 220: 253–261. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.056.
- [15] RAMANAN R, KIM B H, CHO D H, et al. Algae-bacteria interactions: Evolution, ecology and emerging applications [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(1): 14–29.
- [16] HOOPER A B, TERRY K R. Photoinactivation of ammonia oxidation in *Nitrosomonas* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1974, 119(3): 899–906.
- [17] LI S N, QU W Y, CHANG H X, et al. Microalgae-driven swine wastewater biotreatment: Nutrient recovery, key microbial community and current challenges [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 440: 129785. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129785.
- [18] FALLAHI A, REZVANI F, ASGHARNEJAD H, et al. Interactions of microalgae-bacteria consortia for nutrient removal from wastewater: A review [J]. *Chemosphere*, 2021, 272: 129878. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129878.
- [19] CHOI O, DAS A, YU C P, et al. Nitrifying bacterial growth inhibition in the presence of algae and cyanobacteria [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2010, 107(6): 1004–1011.
- [20] SU Y, MENNERICH A, URBAN B. Synergistic cooperation between wastewater-born algae and activated sludge for wastewater treatment: Influence of algae and sludge inoculation ratios [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 105: 67–73. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.113.
- [21] FALLAHI A, HAJINAJAF N, TAVAKOLI O, et al. Cultivation of mixed microalgae using municipal wastewater: Biomass productivity, nutrient removal, and biochemical content [J]. *Iranian Journal of Biotechnology*, 2020, 18(4): 88–97.
- [22] REZVANI F, SARRAFZADEH M H, EBRAHIMI S, et al. Nitrate removal from drinking water with a focus on biological methods: A review [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(2): 1124–1141.
- [23] MEZZARI M P, DA SILVA M L B, NICOLOSO R S, et al. Assessment of N₂O emission from a photobioreactor treating ammonia-rich swine wastewater digestate [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 149: 327–332. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.09.065.
- [24] PETROVIĆ A, SIMONIĆ M. Effect of *Chlorella sorokiniana* on the biological denitrification of drinking water [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(7): 5171–5183.
- [25] HOLMES B, PADDOCK M B, VANDERGHEYNST J S, et al. Algal photosynthetic aeration increases the capacity of bacteria to degrade organics in wastewater [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2020, 117(1): 62–72.
- [26] REZVANI F, SARRAFZADEH M H, SEO S H, et al. Optimal strategies for bioremediation of nitrate-contaminated groundwater and microalgae biomass production [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(27): 27471–27482.
- [27] LIU L, ZENG Z, BEE M, et al. Characteristics and performance of aerobic algae-bacteria granular consortia in a photo-sequencing batch reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 349: 135–142. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.01.059.
- [28] SARAVANAN A, KUMAR P S, VARJANI S, et al. A review on algal-bacterial symbiotic system for effective treatment of wastewater [J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129540. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129540.
- [29] REZVANI F, SARRAFZADEH M H, OH H M. Hydrogen producer microalgae in interaction with hydrogen consumer denitrifiers as a novel strategy for nitrate removal from groundwater and biomass production [J]. *Algal Research*, 2020, 45: 101747. DOI: 10.1016/j.algal.2019.101747.
- [30] JI X Y, JIANG M Q, ZHANG J B, et al. The interactions of algae-bacteria symbiotic system and its effects on nutrients removal from synthetic wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 44–50. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.09.074.
- [31] PATEL A, BARRINGTON S, LEFSRUD M. Microalgae for phosphorus removal and biomass production: A six species screen for dual-purpose organisms [J]. *Gcb Bioenergy*, 2012, 4(5): 485–495.
- [32] BUNCE J T, NDAM E, OFITERU I D, et al. A review of phosphorus removal technologies and their applicability to small-scale domestic wastewater treatment systems [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 8. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00008.
- [33] 毕贞, 武静, 欧阳志康, 等. 聚磷生物膜法磷回收研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2022, 49(8): 3387–3400.
- BI Z, WU J, OUYANG Z K, et al. Phosphorus recovery by polyphosphate-accumulating organisms biofilm system: A review [J]. *Microbiology China*, 2022, 49(8): 3387–3400.
- [34] ONG Y H, CHUA A S M, HUANG Y T, et al. The microbial community in a high-temperature enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process [J]. *Sustainable Environment Research*, 2016, 26(1): 14–19.
- [35] IZADI P, IZADI P, ELDYASTI A. Design, operation and technology configurations for enhanced biological phosphorus removal (EBPR) process: A review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2020, 19(3): 561–593.

- [36] SELLS M D, BROWN N, SHILTON A N. Determining variables that influence the phosphorus content of waste stabilization pond algae [J]. *Water Research*, 2018, 132: 301–308. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.013.
- [37] JI B, ZHANG M, WANG L, et al. Removal mechanisms of phosphorus in non-aerated microalgal-bacterial granular sludge process [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 312: 123531. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123531.
- [38] DELGADILLO-MIRQUEZ L, LOPES F, TAIDI B, et al. Nitrogen and phosphate removal from wastewater with a mixed microalgae and bacteria culture [J]. *Biotechnology Reports*, 2016, 11: 18–26. DOI: 10.1016/j.btre.2016.04.003.
- [39] SU Y, MENNERICH A, URBAN B. Municipal wastewater treatment and biomass accumulation with a wastewater-born and settleable algal-bacterial culture [J]. *Water Research*, 2011, 45 (11): 3351–3358.
- [40] HIGGINS B T, GENNITY I, FITZGERALD P S, et al. Algal-bacterial synergy in treatment of winery wastewater [J]. *NPJ Clean Water*, 2018, 1(1): 1–10.
- [41] DE-BASHAN L E, ANTOUN H, BASHAN Y. Involvement of indole-3-acetic acid produced by the growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. in promoting growth of *Chlorella vulgaris* 1 [J]. *Journal of Phycology*, 2008, 44(4): 938–947.
- [42] BOGAERT K A, BLOMMAERT L, LJUNG K, et al. Auxin function in the brown alga *Dictyota dichotoma* [J]. *Plant Physiology*, 2019, 179(1): 280–299.
- [43] PENG H, DE-BASHAN L E, HIGGINS B T. *Azospirillum brasilense* reduces oxidative stress in the green microalgae *Chlorella sorokiniana* under different stressors [J]. *Journal of Biotechnology*, 2021, 325: 179–185. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.10.029.
- [44] LIU J Z, DANNEELS B, VANORMELINGEN P, et al. Nutrient removal from horticultural wastewater by benthic filamentous algae *Klebsormidium* sp., *Stigeoclonium* spp. and their communities; From laboratory flask to outdoor algal turf scrubber (ATS) [J]. *Water Research*, 2016, 92: 61–68. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.049.
- [45] GOSWAMI R K, AGRAWAL K, VERMA P. An overview of microalgal carotenoids; Advances in the production and its impact on sustainable development [J]. *Bioenergy Research*, 2021: 105–128. DOI: 10.1002/9781119772125.ch6.
- [46] GOSWAMI R K, MEHARIYA S, KARTHIKEYAN O P, et al. Multifaceted application of microalgal biomass integrated with carbon dioxide reduction and wastewater remediation: A flexible concept for sustainable environment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 339: 130654. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130654.
- [47] ABID A I, BCHIR F S, HAMDI M. Feasibility of carbon dioxide sequestration by *Spongiocloris* sp. microalgae during petroleum wastewater treatment in airlift bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 234: 297–302. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.03.041.
- [48] ZHAO X, ZHOU Y, HUANG S, et al. Characterization of microalgae-bacteria consortium cultured in landfill leachate for carbon fixation and lipid production [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 156: 322–328. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.12.112.
- [49] VAN DEN HENDE S, VERVAEREN H, DESMET S, et al. Bioflocculation of microalgae and bacteria combined with flue gas to improve sewage treatment [J]. *New Biotechnology*, 2011, 29 (1): 23–31.
- [50] SHEN Q H, JIANG J W, CHEN L P, et al. Effect of carbon source on biomass growth and nutrients removal of *Scenedesmus obliquus* for wastewater advanced treatment and lipid production [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 190: 257–263. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.053.
- [51] YOU X G, YANG L B, ZHOU X F, et al. Sustainability and carbon neutrality trends for microalgae-based wastewater treatment: A review [J]. *Environmental Research*, 2022, 209: 112860. DOI: 10.1016/j.envres.2022.112860.
- [52] CALVIN M. Forty years of photosynthesis and related activities [J]. *Interdisciplinary Science Reviews*, 1997, 22(2): 138–148.
- [53] MANHAEGHE D, BLOMME T, HULLE S W H V, et al. Experimental assessment and mathematical modelling of the growth of *Chlorella vulgaris* under photoautotrophic, heterotrophic and mixotrophic conditions [J]. *Water Research*, 2020, 184: 116152. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116152.
- [54] SU Y Y. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 762: 144590. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144590.
- [55] HUERTAS I E, COLMAN B, ESPIE G S, et al. Active transport of CO₂ by three species of marine microalgae [J]. *Journal of Phycology*, 2000, 36(2): 314–320.
- [56] 邓洁, 李建宏, 管章玲, 等. 一株产碳酸酐酶附生菌对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 生长的影响 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 429–435.
- DENG J, LI J H, GUAN Z L, et al. Effect of attached bacteria of carbonic anhydrase on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(3): 429–435.
- [57] LIN J Y, XUE C F, TAN S I, et al. Pyridoxal kinase PdxY mediated carbon dioxide assimilation to enhance the biomass in *Chlamydomonas reinhardtii* CC-400 [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 322: 124530. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124530.