

能源环境保护

Energy Environmental Protection

ISSN 1006-8759, CN 33-1264/X

《能源环境保护》网络首发论文

题目：微藻固碳耦合工业废水处理技术研究进展
作者：张亚雷，郝泽伟，由晓刚，姚广磊，贾炎，杨黎彬，陈家斌，周雪飞
收稿日期：2022-11-15
网络首发日期：2022-12-23
引用格式：张亚雷，郝泽伟，由晓刚，姚广磊，贾炎，杨黎彬，陈家斌，周雪飞. 微藻固碳耦合工业废水处理技术研究进展[J/OL]. 能源环境保护.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//33.1264.X.20221222.0821.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

微藻固碳耦合工业废水处理技术研究进展

张亚雷^{1,2}, 郝泽伟^{1,2}, 由晓刚^{1,2}, 姚广磊^{1,2}, 贾炎^{1,2}, 杨黎彬^{1,2}, 陈家斌^{1,2}, 周雪飞^{1,2}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 工业废水处理行业是我国现代化进程中不可或缺的一部分, 在工业化发展历程中扮演着重要的角色, 但是传统的废水处理工艺会消耗大量的资源能源, 并产生温室气体, 对人类和生态系统造成了严重的威胁。在当前双碳背景下, 迫切需要寻求一种低碳、绿色的工业废水处理理论和技术, 以进一步满足我国工业废水的绿色、低碳化处理。微藻固碳耦合工业废水处理被认为是一种绿色环保、可持续发展的低碳技术, 将其应用于工业废水和燃煤烟气的处理, 能够有效固定、净化污水和烟气中的碳、氮、磷等污染物质, 减少碳排放, 还可以获得有价值的生物质资源, 为废水处理带来显著的环境效益与经济效益。因此, 对微藻处理工业废水的主要作用机制、燃煤烟气的减排机理和微藻固碳的强化措施进行了系统探讨, 旨在对传统污水处理工艺进行低碳化重塑, 促进污水处理行业革新升级, 引领污水处理向低碳化方向发展。

关键词: 微藻固碳; 工业废水处理; 烟气减排; 耦合工艺; 强化措施

中图分类号: X703; X701 文献标识码: A

Research progress of microalgae carbon sequestration coupled with industrial wastewater treatment technology

ZHANG Yalei^{1,2}, HAO Zewei^{1,2}, YOU Xiaogang^{1,2}, YAO Guanglei^{1,2}, JIA Yan^{1,2},
YANG Libin^{1,2}, CHEN Jiabin^{1,2}, ZHOU Xuefei^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The industrial wastewater treatment industry is an integral part of China's modernization process and plays an important role in the course of industrialization. However, the traditional wastewater treatment process consumes a large amount of resources and energy and produces greenhouse gases, which poses a serious threat to human beings and the ecosystem. In the context of implementing double carbon strategy, there is an urgent need to seek a low carbon and green industrial wastewater treatment theory and technology to further meet the green and low carbon treatment of industrial wastewater in China. Microalgae carbon sequestration coupled with industrial wastewater treatment is considered to be a green and sustainable low-carbon technology. Applying it to the treatment of industrial wastewater and coal-fired flue gas can effectively fix and purify pollutants such as carbon, nitrogen and phosphorus in wastewater and flue gas, reduce carbon emissions, and also obtain valuable biomass resources, bringing significant environmental and economic benefits to wastewater treatment. Therefore, the main mechanisms of action of microalgae in treating industrial wastewater, the mechanism of emission reduction of coal-fired flue gas and the enhancement measures of carbon sequestration by microalgae were discussed systematically, aiming to reshape the traditional wastewater treatment process in a low-carbon way, promote the

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200604); 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202105); 上海市科委科技创新行动计划项目(22dz1205700)

作者简介: 张亚雷(1971—), 男, 江苏淮安人, 教授, 主要从事污水处理与资源化研究; Email: zhangyalei@tongji.edu.cn

innovation and upgrading of the wastewater treatment industry and lead the development of wastewater treatment in a low-carbon direction.

Keywords: Microalgae carbon sequestration; Industrial wastewater treatment; Flue gas emission reduction; Coupling process; Strengthening measures

0 引言

随着工业化和城市化的快速发展,碳排放量增加,全球气候变暖,温室效应发生,极端恶劣天气频繁出现,冰川加速融化,海平面逐渐上升,人们赖以生存和发展的环境正在发生变化并面临巨大的威胁^[1-2]。目前全球已有超过120个国家和地区提出了碳中和目标,“低碳经济”发展势在必行,促使人们寻找更有效和可持续的CO₂固定及资源化利用技术^[3-4]。要想实现“碳中和”的艰巨任务,应当大力提倡节能减排,实现产业结构的转化升级,更新落后产业和产能,以绿色清洁能源替代传统的富碳化石能源,减少碳排放;另一方面应当鼓励科技创新,强化CO₂固定、利用与封存,从源头实现碳的减排^[5]。我国积极参与全球治理,将温室气体减排任务纳入国家“五年规划”和“2035目标”,力争CO₂的排放量于2030年前达到峰值,积极争取在2060年前实现碳中和^[6]。“碳达峰、碳中和”既是我国应对全球变化的庄严承诺,也是我国实现社会绿色、可持续发展的必由之路。发展CO₂的高效资源化利用技术,可以有效缓解迫切的环境和能源压力,也是实现“双碳”目标的重要途径和策略。

生物固碳被认为是一种去除CO₂非常安全、有效而经济的方法,受到了越来越多的关注和研究,可以将CO₂作为原料生产生物燃料、高值化学品及保健品等物质,用以构建低碳、绿色的资源化利用的新能源体系^[7]。微藻作为典型的代表,具有光合速率高、繁殖快、环境适应性强、处理效率高、可调控以及易与其它工程技术集成等优势,被广泛的应用于废水和燃煤烟气的处理和净化^[8-9]。同时,在微藻耦合燃煤电厂烟气、生活污水、工业污水处理的系统中,不但可以固定废水中的碳、氮、磷等营养物质,还可以控制烟气中的CO₂、NO_x和SO_x浓度,并

可通过一系列的转化,将微藻生物质中含有蛋白质、多糖、脂质等物质转化为生物柴油、乙醇、甲烷等生物燃料或其他高附加值产品,具有广阔的应用前景^[10-11]。

因此,本文对近年来微藻培养耦合工业废水和烟气处理的研究进行了系统梳理,并对微藻在工业废水和烟气中的主要作用机制进行了分析和探讨。同时,结合现阶段微藻生物固碳技术所面临的重要挑战,提出了微藻耦合烟气固碳技术的强化措施。未来这一技术的发展应用有望成为“碳达峰、碳中和”战略目标实现的助推剂,为我国和全球的绿色低碳进程提供可靠的参考和指导。

1 微藻处理工业废水的主要作用机制

随着我国工业化进程的逐步推进,石油、煤炭、冶金、皮革、制药等行业每年都会产生大量的工业废水,其中化工和造纸行业产生的工业废水达到了总量的30%以上。工业废水由于氨氮浓度高、有机物含量高、污染物种类多等特征,被视为是最难处理的水体之一,因此强化工业废水的处理方式和力度已经成为重要的环境难题。光合作用具有效率高、抗干扰性强等特点。微藻可以利用污水中的氮、磷等元素作为营养物质,实现在恶劣环境中的快速生长,从而实现工业废水的减量化和生物质能的资源化。污水中微藻可以利用的各类营养物质详见表1^[12]。因此,利用污水培育微藻,不仅可以吸收空气中的CO₂,还能实现对富含氮磷元素及高浓度有机物工业废水的高效处理。

表1 污水中可参与微藻生长的各类营养物质^[12]

Table 1 Types of nutrients that can be involved in the growth of microalgae in wastewater^[12]

营养物质	机理	运输方式
有机碳	参与呼吸代谢	主动运输/扩散
硝基氮	还原并转化为氨基酸	主动运输
氨基氮	直接转化为氨基酸	主动运输
磷	磷酸化参与代谢	主动运输

1.1 微藻固氮除磷主要机制

工业废水中的氮磷资源主要分为有机源和无机源两大类,无机源为微藻主要的吸收对象。微藻在生长过程中通过同化吸收污水中的无机氮成分,首先将污水中的硝基氮或亚硝基氮转化为铵根离子,铵根离子进一步被微藻利用参与氨基酸等有机化合物的合成^[13]。此外,废水中氨气的挥发以及氨氮参与硝化和反硝化反应也能有效降低污水中的氮含量。在碱性条件下,氨可以转化为氨气从污水中挥发。硝化和反硝化作用则可以利用一些氨氧化细菌将铵根离子氧化为亚硝基氮和硝基氮,再进一步还原为氮气或一氧化氮,从而实现对水体中氮的去除^[14]。至于工业废水中的有机氮成分,可以被水体中的一些细菌分泌的酶类物质如谷氨酸 2-酮戊二酸氨基转移酶、谷氨酸脱氢酶等部分转化为氨氮形式,并进一步通过无机氮的转化途径去除^[15]。

微藻主要利用无机态的磷酸盐如 H_2PO_4^- 或 HPO_4^{2-} 参与自身生长。藻体细胞可以通过光合磷酸化、氧化磷酸化等过程将磷酸盐转化为脂质等有机化合物。磷酸化过程中引发的 pH 波动也会有效促进污水中氨气的挥发和部分磷酸盐的沉降,从而间接降低污水中氮、磷含量^[16]。除去微生物生长所需要的磷之外,微藻也可以过量吸收无机态磷将其作为胞内磷酸盐进行储存。此外,废水中存在的部分有机磷可以与胞外聚合物相结合,并被细胞或细菌分泌的酶类物质分解为磷酸盐,再进一步转化为微藻生长所需要的营养物质^[17]。例如,Debashan 等^[18]人通过海藻酸钠固定小球藻将污水中的氨氮、总氮和总磷分别降低了 100%、92% 和 100%。

1.2 微藻去除难降解有机物主要机制

通过有效的转化路径和同化机制,藻类可以将水体中的部分难降解有机物转化为自身成长所需的营养物质和能量,或者利用水解作用将其转化为挥发性脂肪酸^[19]。有机物首先与胞外分泌物的官能团相结合,然后在细菌和真菌的作用下被降解为微藻生长所需的有机碳或小分子脂肪酸。降解形成的有机碳以多糖转运蛋白为载体,通过主动运

输或者扩散作用进入细胞内,进一步参与到微藻的生长过程中^[20]。以典型的葡萄糖为例,其在细胞内部不仅可以通过酶催化反应生成细胞生长所需的丙酮酸,也可以在线粒体中转化为新型的多肽和氨基酸等物质^[21]。与此同时,工业废水中过量的有机物浓度也会抑制微藻的生长。因此,只有在适宜的有机物浓度和光照条件下,有机物才能被有效降解^[22]。总体来说,目前微藻在降解有机物方面的机理探究相对较少,未来仍需要进行深入发掘。

1.3 微藻去除重金属主要机制

工业废水中重金属离子的去除方式主要分为物理法、化学法和生物法^[23]。物理法主要利用吸附、冷凝、萃取等方式提取水中的重金属成分,而不引起物质转变。化学法利用沉淀、还原等化学手段实现对重金属的转化去除。生物法则是在微藻生长过程中通过吸附和吸收作用去除水中的重金属。相比于物理法和化学法,生物法不仅成本低、选择性高,对重金属的富集作用更强,且不会引发二次污染。微藻细胞在生长过程中表面会分泌大量的胞外聚合物,例如多糖,磷脂等物质,这些物质本身存在着大量的官能团结构,例如羟基(—OH)、羧基(—COOH)等,可以与水体中的金属离子发生离子交换、氧化还原等络合反应,进一步转化为细胞生长所需要的营养成分或被储存在细胞内^[24]。Bayramoglu 等^[25]探究了四尾栅藻对废水中重金属成分的去除效果。根据实验探究,海藻酸钠固定的四尾栅藻对 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的去除量分别达到了 75.6、55.2、30.4 mg/g,展示出优异的重金属去除能力。Kazuo 等^[26]开展的重金属离子去除实验表明,用海藻酸钙固定的莱茵衣藻和鱼腥藻对工业废水中 Cd^{2+} 的吸附量分别可达到 61.3 mmol/g 和 51.2 mmol/g。

2 微藻烟气固碳及减排机理

工业革命以来,燃煤烟气 CO_2 的大量排放引发了严重的温室效应,造成了全球气候变暖和极端气候的频发。在当前世界经济一

体化和碳中和目标导向下,人们对 CO₂ 的排放和回收提出了更高要求。以微藻为代表的 光合固碳及减排技术由于绿色、经济等特点 受到了国内外研究者的广泛关注。微藻处理 烟气时,可以通过光合作用固定烟气中的 CO₂, 并吸收 NO_x 和 SO_x 作为生长所需的氮 源及硫源^[27]。作为一种新型燃煤烟气处理模 式,微藻固碳减排技术能够有效降低燃煤烟 气中的二氧化碳等主要污染物的排放,并进 一步转化为微藻生物质资源,具有广阔的应 用前景。

2.1 烟气减排过程中微藻光合固碳机制

光合固碳是指生物体利用光合作用固 定 CO₂ 生成有机物实现碳循环的过程,被认 为是目前最有效、最直接的 CO₂ 回收方法。 与其他传统生物相比,微藻光合速率和固碳 效率较高,可以在短时间内获得大量高固碳 效率的有机物(如图 1 所示)^[28]。微藻在固 碳过程中通过光合作用将大量 CO₂ 转化为 微藻生长所需的有机物,另有部分 CO₂ 会溶 解在微藻的悬浮液中。烟气中的 CO₂ 首先通 过气液传质进入到微藻表面,并主要以碳酸 根离子、碳酸和 CO₂ 的形式存在。CO₂ 可以 通过主动运输进入到微藻细胞内,并利用细 胞质被进一步迁移至叶绿体。叶绿素存在大 量的羧酶体位点,可以实现 CO₂ 的高浓度富 集,同时在高活性酶的催化下,转化为磷酸 甘油酸,从而利用卡尔文循环实现对碳的固 定。微藻中由 CO₂ 转化形成的有机物可以进 一步被转化为高附加值产品。

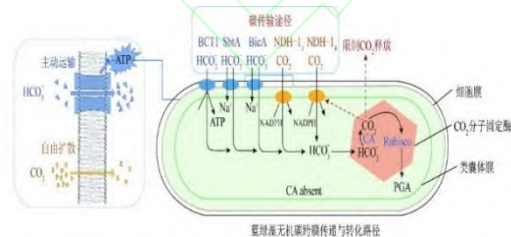


图 1 CO₂ 在微藻细胞内的同化流程^[28]

Fig.1 Assimilation process of CO₂ in microalgal cells^[28]

2.2 烟气中微藻固碳胁迫因子

燃煤产生的烟气中通常含有高浓度的 氮氧化物(NO_x),其中 NO 为烟气中的主 要成分(占 90%以上)。传统的氮去除方法 能耗大,安全性低,且易造成二次污染。氮

恰好是微藻细胞生长和代谢所需的重要营 养物质,通过微藻培养脱氮,不仅可以脱去 工业烟气中的 NO_x,而且可以提供生物燃料 的原料,生产高附加值产品^[29]。微藻减排 NO_x 过程可分为直接脱氮过程和间接脱氮 过程。直接脱氮过程是指微藻直接利用溶解 在液相中的 NO;间接脱氮过程是指烟气中 的 NO 首先溶解在液相中,被氧化为硝酸盐 和亚硝酸盐,然后再作为氮源被藻类细胞吸 收(如图 2 所示)^[30]。

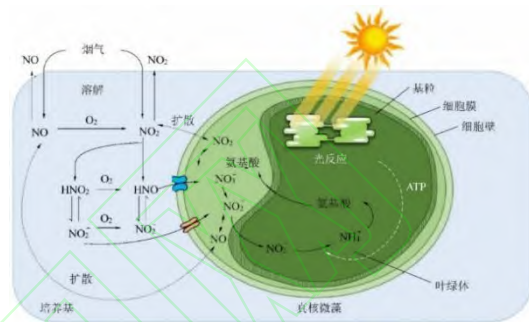


图 2 微藻减排 NO_x 机理^[30]

Fig.2 Mechanism of NO_x reduction by microalgae^[30]

烟气中的 SO_x 主要包括 SO₃ 和 SO₂, 产 生的 SO_x 种类取决于燃烧温度、灰分组成及 燃料中硫的化学性质等因素。由于 SO_x 易溶 于水使溶液呈酸性,高浓度的 SO_x 会对微藻 的生长速度和整个培养系统的稳定性产生 不利影响(如图 3 所示)^[31]。因此,如何保 持微藻生长的稳定 pH 对于基于微藻处理高 SO_x 浓度的烟气至关重要。

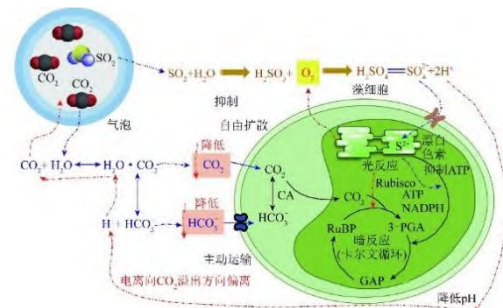


图 3 高浓度 SO_x 对微藻固碳的抑制机理^[31]

Fig.3 Mechanism of inhibition of carbon sequestration by microalgae at high SO_x concentrations^[31]

3 工业废水介导的微藻固碳强化措施

微藻的生长和繁殖离不开营养物质的供应和光合作用。然而，微藻的生长代谢过程会受外界环境条件的干扰，相关酶活性的变化也会使微藻的固碳性能以及污染物同化能力受到影响。因此通过适当的技术手段改善微藻的培养条件，促进微藻生长和营养物质的吸收，提高固碳能力是未来工业废水处理耦合烟气培养微藻技术的重要发展方向。结合微藻生长所需的必要条件，典型的耦合强化手段可以从多相传质优化、光传输利用强化以及培养系统改进 3 个方面开展。

3.1 多相传质优化

微藻在生长过程中营养物质以及 CO_2 的利用涉及复杂的多相传质过程，直接关系到微藻的繁殖速度。在光生物反应器中的 CO_2 传质速率是影响微藻光合固碳效率的关键性限制因素，烟气中的传质速度往往较低，且光合作用产生的氧气也会干扰 CO_2 的进一步转移，因此烟气中 CO_2 到微藻表面传质的优化至关重要。在微藻处理废水过程中，烟气的连续通入会造成光生物反应器内部气液流动。与单相液体流动相比，气液两相流动具有更好的湍流混合性能和传质效率，有利于反应器内微藻的生长。烟气在曝气过程中引起的剧烈混合会引起微藻悬浮液内部流动，可以防止微藻细胞沉降到底部或者粘附在反应器壁上。混合的营养物与微藻细胞伴随着内部流动，保证了营养物和微藻的均匀分布^[32]。

为了提高传质效率，可以提高 CO_2 在微藻悬浮液中的溶解能力，或延长气体在反应器内的停留时间。 CO_2 通常在反应器中以气泡流的形式参与微藻的固碳行为。气泡在上升过程中内部的 CO_2 气体通过气液传质进入微藻悬浮液并进一步被微藻转化利用。研究人员在反应器中添加适量的金属有机框架 ZIF-8，将其作为 CO_2 传输的中间介质，可以有效提高气体的溶液扩散效率，促进微藻的生长。通过在培养池中安装特定的扰流锥，并产生一定的漩涡和湍流，可以有效提高反应器的气液混合传质。根据反应器流体

形态模拟和传输模型构建，扰流锥可以有效促进微藻的固碳效率。Zhang 等^[33]对有无螺旋扰流器的管式 PBR 内气液两相流动和传质过程进行了模拟，对比结果表明，螺旋扰流器增加了混合，增强了微藻细胞在光区和暗区之间的循环，有利于细胞生长。

3.2 光传输利用强化

微藻的生长依赖于自身的光合作用，因此光照是影响微藻生长的关键因素之一。然而，不同的微藻种类和生成阶段对于光谱的吸收都展现出一定的特异性，因此通过一定的光调控手段，如光照强度或光照周期的改变可以有效提高固碳效率，进一步促进微藻的生长。同时，适当的光强和光质条件也可以有效缓解热量转化对微藻生长的抑制作用。具体的调控原理主要分为以下 3 个方面，调控措施总结见表 2^[34]。不同微藻由于色素种类和含量的差异会展现出不同的光谱吸收特性。通常来讲，红光和蓝光最容易促进微藻的固碳效率。然而，研究表明，小球藻的生长依赖于对红光的大量吸收，而扁藻、微拟球藻等在蓝光下会展现出最高的固碳效率^[35]。因此，准确掌握不同藻种的光谱吸收特性，并以此为基础调节供给光质条件可以有效促进微藻的耦合生成过程。

微藻在不同的生长阶段也会展示出不同的光质需求。例如，在小球藻生长初期，红光对微藻细胞分裂的促进作用更为明显，而在经过一定的培育期后，蓝光更有利于提高小球藻的固碳效率^[36]。探究全周期的微藻光质吸收条件是光调控的前提，在不同时期提供光谱吸收峰值附近的特定波长，能够最大程度地提高微藻的生物量产量和经济实用性。反应器中的微藻密度会影响光的穿透性。研究表明，微藻密度较低时，对蓝红光展现出高吸收特性，但是在达到一定的微藻密度之后，红蓝光的吸收量就会大大降低，到达叶绿素的光大幅度减少，从而影响微藻的固碳效率。通常，蓝光波长较短，能量较高，可以撞击微藻的集光复合体，也容易引发抑制现象。红光波长较长，能量较低，使得其在微藻悬浮液中的传播距离较短^[37]。因此，需控制微藻的培育密度并保持微藻悬浮液良好的混合效果可以进一步提高微藻

的光吸收量。

表 2 微藻固碳光合反应器的光调控策略^[34]

Table 2 Light regulation strategies for microalgal carbon sequestration photosynthetic reactors^[34]

光调控策略	作用	调控方法及设备
太阳定位追踪	光合反应器的放置角度受经纬度的影响。纬度大于北纬 35°。东西向放置的光反应器的光入射面积较大。而小于 35°时，南北放置光反应器更有利于光的接收	太阳追踪设备根据太阳运行轨迹，连续转动，使微藻光反应器模块始终面对太阳
光谱调控	改变光源的光谱分布，可以有效提高光合作用效率	滤光片、染色冷光面板
转变光波长	将光合作用利用率低的光转变为高利用率的光，以提高光合作用能量利用效率	荧光磷将绿光转变为红光
人工光源	可发射适于微藻生长的特定波长的光，以提高光能利用效率和减少热量耗散，降低反应器温度。适用于含有高价值成分的微藻培养	LED 灯具有高效光合辐射效率、光谱分布纯、光谱分布类型丰富、光谱能量调制便捷的特点
等离子体散射	等离子体散射或近场限制可有选择地、限制性地有效波段的光射入光反应器中	
培养密度和光路长度	短光路、高密度、高混合速度可增加闪光效应，降低近光源的光抑制作用和反应器中心光照不足	设置反应器内置光源
光稀释	在强光照射下，将光分散到较大面积，以降低光密度	弯曲表面等光分散导流设备

3.3 微藻光生物反应器的优化

光生物反应器为微藻的生长提高了必要的客观条件，不同的结构尺寸、设计规格、运行模式等都会严重影响微藻的生长速度。传统的微藻反应器主要分为开放式和封闭式两种。开放式系统结构简单成本低廉，但微藻生长只能依赖太阳光提供的能量且传质速率十分缓慢。封闭式系统可以将微藻培养体系与外部的环境隔离起来，从而提供可调控的培育环境，进一步提高废水处理和光合固碳性能。相比于开放式系统，封闭式系统需要更大体积的反应器，微藻的采收也存在一定障碍，极大地影响了微藻的大规模应用。

近年来出现的微藻光生物反应器，展现出微藻生长速度快、负载量高、运行稳定性好等特点，已经受到了研究人员的广泛关注。研究表明，光生物反应器产生相同的微藻量所需空间仅仅为传统的开放式跑道池体系的 1/3^[38]。生物膜式光生物反应器以基底为载体，微藻在载体表面不断生长繁殖，从而形成致密的微藻生物膜，这种生物膜具

有负载量大、稳定性好等特点。根据载体的不同类型，生物膜式光生物反应器也可以分为悬浮式生物膜体系和吸附式生物膜体系。悬浮式是在传统的微藻生长系统中加入一定量的吸附载体，从而促进微藻在其表面的快速生长。例如，在微藻培育过程中加入适量的棉花，同时通过曝气控制使其悬浮在培养系统中，部分微藻则会在棉花的表面生长繁殖。相比于传统的纯悬浮式反应体系，加入棉花后微藻的生物产量提高了近 30%^[39]。吸附式生物膜系统是以多孔的基质材料为载体，微藻在其表面负载的同时，还能利用多孔载体中的营养成分实现自身的快速生长。生物膜贴壁培养是一种典型的吸附式生物膜系统，该体系可以通过两侧的滤膜为微藻提供生长环境，外部的营养物质和 CO₂ 也可以通过滤膜到达微藻表面，从而减小了系统的固液传质距离，进一步加速了微藻的生长^[40]。然而光生物反应器目前仍处于实验室探究阶段，建造和运行成本相对较高，同时关键的参数调控和膜污染等问题也有待被进一步关注和解决。

4 结语与展望

微藻固碳耦合工业废水处理作为一种新型的废水处理和燃煤烟气处理技术,具有处理效率高、操作简单和运行费用低等优势,得到了广泛的关注和研究,为缓解我国水污染和环境修复等领域提供了新的策略,对我国水处理行业的发展和实现“碳达峰”、“碳中和”的目标有着极为重要的作用。然而,微藻的培育和发展也面临着众多的挑战,由于技术水平和生产成本限制,目前微藻固碳耦合工业废水处理技术仍处于萌芽阶段,要想加快微藻固碳规模化发展,未来还需要对微藻固碳的内在机理和胁迫影响因素做进一步探究。

参考文献 (Reference)

- [1] 徐蔚冰. 全球能源危机或成打开能源钥匙[J]. 新能源科技, 2021(12): 28-29.
XU Weibing. The global energy crisis may hold the key[J]. New Energy Technology, 2021(12): 28-29.
- [2] Wang Y Z. Carbon peak, carbon neutrality and China's new energy revolution [J]. Social Sciences Digest, 2022(1): 5-7.
- [3] 张亚雷, 褚华强, 周雪飞, 等. 废水微藻资源化处理原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [4] Xiang Y, Guo Y T, Wu Gang, et al. Low-carbon economic planning of integrated electricity-gas energy systems[J]. Energy, 2022, 249: 123755.
- [5] You X, Yang L, Zhou X, et al. Sustainability and carbon neutrality trends for microalgae-based wastewater treatment: A review[J]. Environmental Research, Section A, 2022(209): 112860.
- [6] 郑思米, 魏群, 马湘蒙, 等. 小球藻-菌剂联合处理氨氮废水的实验研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(4): 44-53.
ZHENG Simi, WEI Qun, MA Xiangmeng, et al. Experimental study on the combined treatment of ammonia nitrogen wastewater by *Chlorella* and bacteria agent[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36 (4) : 44-53.
- [7] 陈温福, 张伟明, 孟军, 等. 生物炭应用技术研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 83-89.
CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun, et al. Researches on biochar application technology[J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(2): 83-89.
- [8] Luo L Z, Li M, Luo S, et al. Enhanced removal of humic acid from piggery digestate by combined microalgae and electric field[J]. Bioresource Technology, 2022, 347: 126668.
- [9] Ghaderpour S, Ahmadifard N, Agh N, et al. Short-term enrichment of microalgae with inorganic selenium and zinc and their effects on the mineral composition of microalgae and marine rotifer *Brachionus plicatilis*[J]. Aquaculture Nutrition, 2021, 27(6): 2772-2785.
- [10] 李建华, 李超. 微藻能源的发展及其在环境保护中的应用[J]. 能源环境保护, 2015, 29(3): 8-10.
LI Jianhua, LI Chao. Development of microalgae energy and the application in environmental protection[J]. Energy Environmental Protection, 2015, 29(3): 8-10.
- [11] Tizvir A, Shojaeefard M H, Zahedi A, et al. Performance and emission characteristics of biodiesel fuel from *Dunaliella tertiolecta* microalgae[J]. Renewable Energy, 2022, 182: 552-561.
- [12] 罗智展, 舒琥, 许瑾, 等. 利用微藻处理污水的研究进展[J]. 水处理技术, 2019, 45(10): 17-23.
LUO Zhizhan, SHU Hu, XU Jin, et al. Research progress of wastewater treatment by microalgae[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(10): 17-23.
- [13] Goncalves A L, Pires J C M, Simoes M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment[J]. Algal Research, 2016, 24: 403-415.
- [14] Fitzgerald C M, Camejo P, Oshlag J Z, et al. Ammonia oxidizing microbial communities in reactors with efficient nitrification at low-dissolved oxygen[J]. Water Research, 2015, 70: 38-51.
- [15] Simsek H, Kasi M, Ohm J B, et al. Impact of solids retention time on dissolved organic nitrogen and its biodegradability in treated wastewater[J]. Water Research, 2016, 92(2016): 44-51.
- [16] Goncalves A L, Pires J C M, Simões M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment[J]. Algal Research, 2017, 24: 403-415.
- [17] Zhu Y, Wu F, Feng W, et al. Interaction of alkaline phosphatase with minerals and sediments:

- Activities, kinetics and hydrolysis of organic phosphorus[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2016, 495: 46-53.
- [18] Sun J, Yang L, Xiao S. A promising microalgal wastewater cyclic cultivation technology: Dynamic simulations, economic viability, and environmental suitability[J]. *Water Research: A Journal of the International Water Association*, 2022, 217: 118411.
- [19] 廖怀玉. 膜曝气-菌藻共生耦合体系的构建及污染物去除效能研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2022: 3-12.
- [20] 黄悦. 水中有机物和营养盐对藻类繁殖的耦合作用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021: 5-12.
- [21] 田永婷. 光强及葡萄糖浓度影响蛋白核小球藻生长特性及产物积累的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022: 35-45.
- [22] 穆亮亮, 黄旭雄. 混合营养模式下三种有机物对蛋白核小球藻生长及细胞组成的影响[J/OL]. *上海海洋大学学报*: 1-14[2022-12-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.2024.s.20220523.1637.004.html>.
- MU Liangliang, HUANG Xuxiong. Effects of three organic substances on the growth and intracellular composition of *Chlorella pyrenoidosa* under mixotrophic mode[J/OL]. *Journal of Shanghai Ocean University*:1-14[2022-12-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.2024.s.20220523.1637.004.html>.
- [23] 尚海. 固定化微藻对废水中氮、磷的去除及其特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018: 2-4.
- [24] Shokri Khoubestani R, Mirghaffari N, Farhadian O. Removal of three and hexavalent chromium from aqueous solutions using a microalgae biomass-derived biosorbent[J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2015, 34(4): 949-956.
- [25] Bayramoglu G, Yakup A M. Construction a hybrid biosorbent using *Scenedesmus quadricauda* and Ca-alginate for biosorption of Cu(II), Zn(II) and Ni(II): Kinetics and equilibrium studies[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100 (1): 186-193.
- [26] Kazuo Kondo, Kenji Hirayama, Michiaki Matsumoto. Adsorption of metal ions from aqueous solution onto microalga entrapped into Ca-alginate gel bead[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2013, 51 (22-24): 4675-4683.
- [27] 李玉国, 李芳. 燃煤烟气微藻固碳减排技术现状及发展[J]. *皮革制作与环保科技*, 2021, 2(14): 108-109.
- LI Yuguo, LI Fang. Current status and development of coal-fired flue gas microalgae carbon fixation and emission reduction technologies[J]. *Leather Manufacture and Environmental*, 2021, 2(14): 108-109.
- [28] Huang Yun, Cheng Jun, Lu Hongiang, et al. Transcriptome and key genes expression related to carbon fixation pathways in *Chlorella* PY-ZU1 cells and their growth under high concentrations of CO₂[J]. *Biotechnology for biofuels*, 2017, 10(1): 181.
- [29] Zhang X, Chen H, Chen W, et al. Evaluation of an oil-producing green alga *Chlorella* C₂ for biological DeNO_x of industrial flue gases[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48: 10497-10504.
- [30] 李伟杰, 宋英峰, 王高强. 燃煤烟气微藻固碳减排技术现状与展望[J]. *造纸装备及材料*, 2020, 49 (2): 36.
- [31] Dou B, Pan W, Jin Q, et al. Prediction of SO₂ removal efficiency for wet flue gas desulfurization[J]. *Energy Convers Manage*, 2009, 50: 2547-2553.
- [32] Carvalho A P, Luís A Meireles, Malcata F X. Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances[J]. *Biotechnology Progress*, 2006, 22(6): 1490-1506.
- [33] Zhang Q, Xue S, Liang K, et al. Study of hydrodynamic characteristics in tubular photobioreactors[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2013, 36(2): 143-150.
- [34] 李珂, 李清毅, 郭文文, 等. 高碳与光调控对微藻捕集 CO₂ 的影响机制[J]. *化工进展*, 2020, 39 (11): 4600-4607.
- LI Ke, LI Qingyi, GUO Wenwen, et al. Influencing mechanism of high CO₂ and light regulation on microalgal carbon mitigation[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39 (11): 4600-4607.
- [35] RA C H, SIRISUK P, JUNG J, et al. Effects of light-emitting diode (LED) with a mixture of wavelengths on the growth and lipid content of microalgae[J]. *Bioprocess and Biosystems*

Engineering, 2018, 41(4): 457-465.

[36] TAN X, ZHANG D F, DUAN Z P, et al. Effects of light color on interspecific competition between microcystis aeruginosa and chlorella pyrenoidosa in batch experiment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27: 344-352.

[37] MATTOS E R, SINGH M, CABRERA M L, et al. Enhancement of biomass production in Scenedesmus bijuga high-density culture using weakly absorbed green light[J]. Biomass & Bioenergy, 2015, 81: 473-478.

[38] Yang L, Su Q, Si B. Enhancing bioenergy production with carbon capture of microalgae by

ultraviolet spectrum conversion via graphene oxide quantum dots[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 429 (7781): 132230.

[39] 郭王彪. 微藻三维亚微结构解析及扰流锥闪光反应器研制促进烟气 CO₂ 减排研究[D].杭州: 浙江大学, 2021: 115-133.

[40] 徐俊宸. 管式反应器强化 CO₂ 微气泡生成转化及管池结合促进微藻细胞闪光效应减排燃煤烟气 CO₂ 研究[D].杭州: 浙江大学, 2021: 5-11.

