

“污水-微藻-能源”串联技术新进展

蔡卓平^{1,2}, 段舜山², 朱红惠^{1*}

1. 广东省微生物研究所, 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广东省华南应用微生物重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 广东 广州 510070; 2. 暨南大学水生生物研究中心, 广东 广州 510632

摘要: 水资源危机和能源危机给人类社会的可持续发展带来前所未有的挑战。微藻具有特殊的生理生态功能和突出的优点, 是开展污水净化和生物质能源生产的不二选择。文章在简介微藻清除水体氮磷的特点、作用机理及其影响因素、微藻生产生物质能源的优势、油脂积累机制及其影响因素的基础上, 提出一种基于微藻为中介以实现污水氮磷去除与生物质能源开发的串联技术体系。该“污水-微藻-能源”串联技术体系从微藻自身的生理生态特色出发, 将其在污水净化与生物质能源生产上的优势有机结合起来, 实现从污水中索要营养物质供微藻生长需要, 以低成本、高效开发利用微藻生物质能源, 为共同协调解决水资源危机和能源危机提供了新的思路与途径。通过探讨“污水-微藻-能源”串联技术体系的经营理念与开发基础, 指出串联技术体系必须重视优质微藻品种的选育、光合生物反应器优化、耦合系统的完善以及高附加值胞内物质后续开发等几个关键技术环节。文章最后展望其发展趋势与应用前景。“污水-微藻-能源”串联技术体系的开发应用, 有望缓解当前社会面临的水环境污染和能源紧缺双层压力, 实现社会、经济、资源与环境的可持续发展, 具有极其广阔的应用前景。

关键词: 污水; 微藻; 生物质能源; 串联技术

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 07-1380-07

随着城市化进程的加快, 加上受技术水平、短期利益使然和法制不健全等因素的综合影响, 大量含氮磷营养盐的污水未经严格处理就被排放到公共水域里, 引发一系列水环境污染问题。水污染是环境污染的主要组成部分, 如何高效地去除水体中过量的氮磷营养盐、净化水环境是困扰我们的一大难题, 也是污染治理和环境修复的当务之急^[1-2]。与此同时, 能源短缺也成为目前制约社会经济增长的一大瓶颈, 化石燃料一直是人们消费的主要能源, 但化石资源昂贵且有限, 其燃烧所产生的有害物质会污染环境, 加剧全球气候变暖、生物物种多样性降低和荒漠化等生态问题。为满足社会对能源的需求, 促进资源、环境、经济的协调发展, 急需开发一种经济高效、可再生的清洁能源^[3-4]。

微藻是一类光能自养型单细胞生物, 具有种类繁多、光合效率高、生长速度快、适应性强等特点。它们在生长过程中需要消耗环境中的氮磷等营养物质以合成体内复杂的有机质, 因此可降低水体中氮磷等物质的含量^[5-6]。与其他油料植物相比, 微藻在生产生物柴油方面具有明显的优势。如在一定条件下, 许多微藻细胞可大量积累储藏性油脂, 其最高含量可达到细胞干重的50%以上; 微藻的单位面积油脂产量是油料植物油脂产量的数十倍, 因此微

藻是最有望全面替代石化能源的生物质能源原料^[7-9]。文章主要综述微藻在水体净化以及生物质能源生产上的特点与优势、相关生物学机理及其影响因素; 探讨一种基于微藻为中介以实现污水氮磷去除与生物质能源开发的串联技术体系: 以污水为原料获取新能源, 实现单独污水处理系统中处理工艺向生产工艺的转化, 以污水作为微藻生物质能的“生产资源”为社会和人类服务; 最后对“污水-微藻-能源”串联技术体系中的关键环节进行归纳与展望。

1 微藻处理污水的特点

传统的污水处理方法主要有物理处理法和化学处理法, 其中物理处理法指根据水的物理特性, 通过机械、物理的方法除去水中悬浮物质或有害物质; 而化学处理法指通过向污水中投加化学试剂, 使其与污水中污染物质发生化学反应, 去除污染物。由于物理法和化学法的处理成本较高且存在不同程度的副作用, 所以难以得到大规模的应用和推广。在这样的背景下, 利用微藻处理污水逐渐引起了人们的关注^[10]。微藻污水处理法指在利用微藻自身新陈代谢生理功能基础上, 采取一系列人工配合措施, 创造有利于微藻生长繁殖的良好环境, 加速微藻的增殖及其新陈代谢生理功能, 以降解和去除污水中的氮磷等物质、净化水体的一种新型污水处

基金项目: 国家自然科学基金委(NSFC)-广东联合基金重点项目(U1133003); 国家自然科学基金项目(41176104, 31070103); 广东省自然科学基金重点项目(10251007002000001); 广东省科技攻关项目(2011B090400613)

作者简介: 蔡卓平(1980年生), 男, 博士, 主要从事微藻生理生态与生物技术研究。E-mail: zpcal@scau.edu.cn

***通信作者:** 朱红惠(1970年生), 女, 研究员, 博士, 从事微生物资源研究。E-mail: zhuhonghui66@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-06-18

理方法^[11]。利用微藻处理污水可以克服传统污水处理方法易引起的二次污染、潜在营养物质丢失、资源不能完全利用等弊端，同时能够有效且低成本地去除水体中的氮磷营养物质，被认为是经济高效、简便可行、副作用小的污水处理方法，是今后污水处理技术的研究热点和发展方向^[12]。特别是处理含氮磷营养盐的污水时，利用微藻处理污水具有传统物化法无法媲美的明显优势，例如在去除氮磷的同时可固定二氧化碳、去除氮磷无需投加外部碳源、可把水体的氮磷利用为生长营养物质、清水含有丰富的溶解氧、无二次污染、微藻细胞可回收利用等^[13-14]。

2 微藻净化水体氮磷的原理及其影响因素

研究表明，氮磷营养物质是藻类生长的限制因子，微藻对水体中氮的去除方式主要为吸收利用。微藻细胞利用二氧化碳和碳酸盐作为碳源，通过光合作用进行自养生长，水中的氨氮、硝态氮和亚硝态氮等无机氮和各类有机氮可合成藻体蛋白质等活性物质。水中的磷也可直接被微藻细胞吸收利用。水体的磷进入微藻细胞体内，会通过多种磷酸化途径转化成三磷酸腺苷（ATP）、磷脂等有机物（图1）^[15-16]。

尽管微藻能够有效地吸收污水中的氮磷营养盐，但这种吸收能力受外界因素的影响，包括pH值、温度、污水中氮磷浓度、处理时间以及光照强度等。Aslan等^[17]在pH7.0、温度(20±2)℃、光照4 100 lx、氮磷浓度比2:1的培养条件下，研究普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)对合成废水中氮磷的去除效果，发现当NH₄⁺的初始质量浓度<22 mg·L⁻¹、PO₄³⁻的初始质量浓度<7.7 mg·L⁻¹时，普通小球藻对废水中氨氮的去除效果最好，去除率分别为100%和78%，普通小球藻对NH₄⁺的去除率明显高于对PO₄³⁻的去除率。Kong等^[18]探讨了莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)对污水中氮磷的去除率，结果表明莱茵衣藻处理污水10 d后，对污水中氮和磷的去除速率

分别达到55.8和17.4 mg·L⁻¹·d⁻¹。Domenico等^[19]利用斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)在光暗循环为14:10的条件下处理氮污染水体，发现藻细胞对氮的去除主要发生在有光照的时间段。固定化小球藻对水体氮磷的净化能力要比悬浮小球藻对水体氮磷的净化能力更强。例如，Tam等^[20]研究普通小球藻在悬浮态和固定态下对模拟生活污水的净化效果，结果表明，固定态普通小球藻对氮和磷的去除率分别为78%和94%，而悬浮态普通小球藻对氮和磷的去除率仅为40%和59%。

3 利用微藻生产生物质能源的优势

人类在面临水体污染威胁的同时，还经受着能源危机的挑战，因此积极寻找可再生的、环境友好型的能源是当今社会亟待解决的问题。生物质能源是可再生能源的一种，它具有大规模替代石化柴油的可能性，开发利用生物质能源被认为是解决当前能源危机最好的出路。迄今为止，生物质能源原料的发展主要经历了3代生物体：玉米（第一代生物质能源，以玉米为主要原料生产乙醇）、非粮作物（第二代生物质能源，以秸秆、枯草等非粮作物中的纤维素为主要原料，生产乙醇、纤维素乙醇和生物柴油等）和微藻（某些微藻因含油量高、易于培养、单位面积产量大等优点，被视为新一代能实现完全替代石化柴油的生物质能源原料）^[21]。有学者预测，在未来10~15年，微藻将是全世界最重要的燃料给料，且可望取代传统的化石燃料原料^[22]。微藻与其他能源植物相比，具有以下几方面的优势：（1）微藻的光合效率高，藻体油脂含量高。微藻的全部生物量均能作为生物柴油生产的原料，因此其能量转化效率较其他能源植物要高；按单位面积的产油脂量计算，微藻的产油脂量为47 000~190 000 L·hm⁻²·a⁻¹，是农作物产油脂量的7~30倍；（2）微藻的生长周期短，生长速率高。微藻细胞生长加倍时间通常短于24 h，对数生长期藻细胞物质的加倍时间可短至3.5 h，藻细胞的生长速率远远高于陆

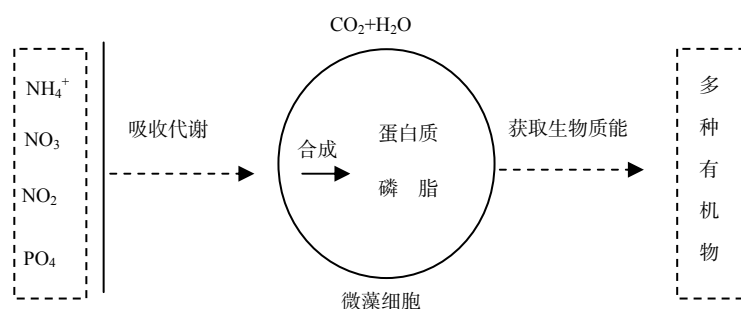


图1 微藻对污水中氮磷的吸收利用原理

Fig. 1 Mechanism of uptake and utilization of nitrogen and phosphorus in wastewater by microalgae

生植物,收获周期大大短于农作物,可以实现微藻高产量的连续收获,因此其生物质能生产潜力远远高于其他能源植物;(3)微藻生物质燃油热值高,生产成本低。微藻类热解所获得的平均生物质燃油热值高达 $33 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,是木材或农作物秸秆的1.6倍;藻类含有较高的脂类、可溶性多糖和蛋白质等易热解的化学组分,所需热解条件相对较低,藻类易被粉碎和干燥,因而其预处理成本也较低。(4)微藻生物质能化过程可产生良好的环境效益。微藻生长过程中需要吸收大量营养物质,利用污水进行微藻培养,不仅能有效地减少污水中的氮磷营养元素,而且可以固定大气中的 CO_2 ,同时实现微藻生物质能源化;微藻生物柴油可生物降解、可再生、无毒性,燃烧不释放氮氧化物和硫氧化物^[23-24]。

4 微藻体内的油脂合成及其影响因素

微藻通过光合作用将 CO_2 固定为有机碳(蛋白质、碳水化合物、油脂等),而藻细胞油脂中的三酰甘油酯是制备生物柴油的主要原料。研究表明,微藻体内脂类合成与高等植物类似,大致可以分为3个步骤,即脂酰辅酶A的合成、3-磷酸甘油的生成、脂酰辅酶A和3-磷酸甘油经脱水缩合形成三酰甘油。微藻细胞可以在进行光合作用的同时积累油脂,推测微藻类主要存在3种油脂合成途径:首先是利用固定的 CO_2 作为三酰甘油合成的碳源,其次是通过碳水化合物分解合成三酰甘油,第三是通过膜脂(糖脂、磷脂)转化合成三酰甘油^[25]。藻细胞通过光合作用将太阳能转化为生物能,人们利用不同加工方式对微藻细胞进行处理即可生产各种生物燃料(图2)^[26]。例如,利用高温高压液化技术或超临界 CO_2 萃取技术可获得藻细胞中的油脂,再通过酯交换技术将其转变为脂肪酸甲酯,即生物柴油;又或者在无氧条件下对微藻细胞进行热解处理,制备焦炭、合成气及氢气等多种生物燃料^[27]。

研究表明,微藻的生长及油脂积累同样受营养条件、温度、光照等外界环境因素的调控。Rodolfi等^[28]筛选到一株油脂含量高的拟微绿球藻

(*Nannochloropsis* sp.),发现该藻在氮充足培养条件下的总脂含量为藻体干生物量的32%,总脂产率为 $117 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$;而在氮缺乏培养条件下的总脂含量为藻体干生物量的60%,总油脂产率高达 $204 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在连续培养条件下,小索囊藻(*Choricystis minor*)的总油脂产率为 $82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[29];双眉藻(*Amphora* sp.)在氮充足条件下的总油脂含量为藻体干生物量的51%,总油脂产率为 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[30];新绿藻(*Neocloris oleoabundans*)在氮充足条件下的总油脂含量为藻体干生物量的36%,总油脂产率为 $136 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[31];杜氏藻(*Dunaliella salina*)在盐度胁迫下,油脂含量可以从盐度正常条件的60%提高到70%^[32];而小球藻在高铁离子浓度胁迫下,中性油脂含量也可提高到56.6%^[33]。硅缺乏也会导致微藻吸收的碳更多用于脂类合成,并且由非脂类化合物逐渐转化成脂类化合物^[34]。虽然营养胁迫可能会增加微藻油脂的含量,但也会使微藻细胞总数及培养液油脂产率减少。因此,微藻应首先在没有限制的条件下生长,待微藻生长到稳定期后,再在胁迫条件下培养。此法虽然一定程度上限制了微藻生长速率,但会使微藻细胞积累更多营养物质,因而并不减少生物产出。此外,光是影响微藻生长及生化成分的重要因子之一。研究表明光照对微藻油脂的积累有影响,低光强能诱导极性油脂的合成,而高光强则能导致中性油脂的积累^[35]。

5 “污水-微藻-能源”串联技术体系的心理念与开发

目前已有研究表明微藻对水体氮磷的净化作用,也有研究探讨利用微藻生产生物质能的潜力,但是几乎所有的研究都基于相对独立的体系进行,或多或少会存在各种限制因素或局限性。以微藻生物质能的开发为例,培养过程中需要给微藻提供一定的生长元素,包括水、无机营养盐和 CO_2 等,以获取大量的微藻细胞制备微藻生物柴油^[36]。尽管微藻相对于传统的油料作物具有明显的优势,可作为新一代生物柴油生产的理想原料,但是在微

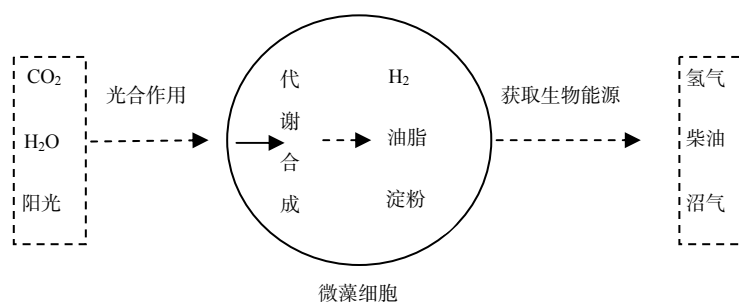


图2 利用微藻获取生物能源的基本原理

Fig. 2 Basic principle of producing bioenergy from microalgae

藻油脂生产过程中仍存在较多的瓶颈,如微藻培养成本过高(微藻培养成本占到微藻生物柴油生产总成本的70%以上),制约了微藻生物质能源技术的发展^[37]。

“污水-微藻-能源”串联技术体系为共同协调解决水体氮磷污染与能源紧缺的形势提供了新途径。这种串联技术体系以微藻生物自身的生理生态特色为基础,将污水净化与生物质能源生产有机结合起来^[38]。技术体系的关键核心在于,含氮磷的生活污水经前期处理后,引入微藻光合生物反应器;选择高生长速率、富油脂的脱氮除磷优势能源微藻接种于微藻光合生物反应器,以污水中的氮磷作为培养基的必需元素以提供微藻生长需要,实现微藻光合生物反应器内部微藻的高密度培养(污水初级处理过程中产生的CO₂可作为微藻生长所需的无机碳源,有利于促进微藻细胞的生长繁殖);通过膜分离技术得到净化后低氮磷含量的供日常使用的清水;分离收获微藻细胞以提取藻体中的油脂,进一步加工制备生物柴油^[39-40]。总之,该串联技术体系通过以污水的氮磷为资源,降低污水处理成本和生物质能源生产成本,摆脱微藻生物柴油单一系统中微藻培养成本过高的困局,可以缓解社会当前面临的水环境污染和能源紧缺双层压力,促进社会、经济、资源与环境的可持续发展。

6 “污水-微藻-能源”串联技术体系的核心技术步骤

“污水-微藻-能源”串联技术体系强调微藻生物培养在水环境治理与能源开发应用方面的有机结合(图3)^[38-39],其核心技术步骤应该包括:

1) 筛选与驯化优质微藻品种。这是串联体系的前提与重点,应搜集与获取不同的微藻种株,通过在室内利用植物生长培养箱批量培养微藻,明确微藻的生长繁殖、氮磷营养盐吸收以及胞内活性物质合成等情况;筛选出细胞生长繁殖迅速、环境适

应能力强、氮磷吸收效率高、胞内油脂含量高的优秀微藻品种。

2) 设计与开发微藻光合生物反应器。这是串联体系的提升环节,应在明确目标微藻生理生态特征的基础上,综合考虑微藻生长的光照、pH值、温度、曝气、搅拌方式等设计要素,研制开发高效、低成本、可规模化运转且适合技术体系的(既能保证微藻有高氮磷去除能力,又能实现微藻胞内油脂快速积累)微藻光合生物反应器。将含氮磷污水接入微藻光合生物反应器,利用微藻细胞的生理特性去除水中氮磷并提供微藻生长需要,通过利用膜分离技术对光合反应器中的微藻和废水进行分离,在系统出水口获得经微藻净化的、水质较好的清水供日常使用。

3) 改进与完善耦合系统中的关键工艺环节。微藻细胞的收集与藻体油脂的提取是串联技术的关键工艺,是实现水体净化和生物质能利用的前提。由于微藻体积小、质量轻、营浮游生活、沉降性能较差,可以通过絮凝、沉淀、气浮、过滤、离心和固定化等微藻细胞收获方式,藻体余液可回流光合生物反应器重复培养和利用;将微藻细胞与水体分离,使出水的水质达到要求,同时回收利用微藻生物资源;采用适合藻体油脂提取的有机溶剂萃取方法,对微藻胞内活性物质(特别是油脂)进行提取,并采用酯交换方法制备生物柴油;提高藻体的收获效率与油脂的提取率,最大限度实现串联技术体系的简便性、经济性和可持续性。

4) 开发与利用其他高附加值胞内物质。进一步采取厌氧发酵等方式对油渣中其他高附加值产物进行开发利用,以保证串联技术体系整体能量净收益的最大化,如对油渣中蛋白质和碳水化合物等有机物进行厌氧发酵,获得沼气和氢气等能量等,实现项目的经济、社会和环境效益。

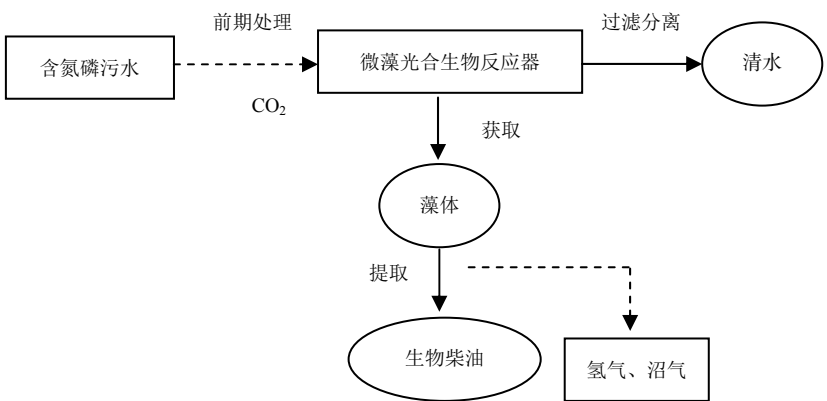


图3 “污水-微藻-能源”串联技术体系的核心环节

Fig. 3 Key links for the sewage-microalga-biofuel coupling technology

7 结语与展望

水环境污染及能源短缺已成为制约当前经济社会可持续发展的瓶颈, 如何去除污水中的氮磷营养盐、净化水环境, 并进一步降低新兴能源成本、减少传统能源污染, 保证我国生态环境和能源产业的持续健康发展是我们当前必须解决的难题^[41]。微藻具有特殊的生理生态功能和突出的优点, 是开展污水处理或生物质能源研究的不二选择; 微藻培养技术的出现, 为污水氮磷去除、水质净化和生物质能源生产提供了可能^[42-43]。“污水-微藻-能源”串联技术体系的关注点不局限于单独的污水氮磷营养去除或单独的微藻生物质能源化技术, 而是将两者有机结合起来, 突破了以往微藻在水环境治理或能源利用方面的单一思维, 可克服微藻污水脱氮除磷或微藻制备生物柴油独立系统的各种局限性。以经前期处理的污水为基质培养藻细胞, 不需消耗大量的淡水资源和无机营养盐, 可极大节省成本; 在工艺流程充分考虑了微藻细胞收获后的开发利用, 实现微藻生物质能源的生产^[44-45]。

在“污水-微藻-能源”串联技术体系中, 我们必须尽可能地提高微藻培养(污水处理)效率以及降低整套串联技术体系的处理成本^[46-47]。因此, 目前急需解决的核心问题应该集中在以下两个方面:

1) 微藻规模化高密度培养的问题。这同样是当前微藻生物技术发展中需要重点解决的关键问题, 必须通过结合藻种筛选、生长条件优化、光合生物反应器设计利用等多种方式, 最大程度获取高密度的微藻细胞和高含量的胞内活性产物, 提高微藻细胞对水体氮磷营养的吸收利用, 提升微藻对水质的净化能力, 同时实现微藻生物质能源的高效开发利用。在上述环节中, 仍需进一步加强细节问题的研究探讨, 例如通过结合不同藻种的生物学、生理生化特征, 调节培养体系的各类生态因子, 保证目标能源微藻在污水培养物中形成优势种, 避免原生动物等敌害生物污染与入侵^[48-49]。

2) 体系中涉及到的处理工艺到生产工艺转化问题。串联体系关注微藻培养在污水处理中去除氮磷、净化水质的应用, 同时强调以污水为原料获取新资源(即利用污水中氮磷作为微藻大规模培养生长必需的营养), 通过耦合污水处理工艺和能源生产工艺环节, 改良微藻细胞的分离、收集和油脂提取等技术, 在高效去除氮磷、深度净化污水的同时, 以低成本获得微藻生物质能源。藻体的采收是目前微藻产油高成本的重要因素, 可以结合絮凝、沉淀、气浮、过滤和离心等方式获取微藻细胞, 同时加强膜处理技术在串联技术体系中的应用研究, 实现微藻细胞与水体更高效率的分离, 降低该串联技术体

系的运行成本^[50]。总之, “污水-微藻-能源”串联技术体系的开发应用, 有望缓解当前社会面临的水环境污染和能源紧缺双层压力, 实现社会、经济、资源与环境的可持续协调发展。

参考文献:

- [1] HAMMOUDA O, GABER A. Microalgae and wastewater treatment[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1995, 31(3): 205-210.
- [2] CHI Z Y, ZHENG Y B, JIANG A P, et al. Lipid production by culturing oleaginous yeast and algae with food waste and municipal wastewater in an integrated process[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 165(2): 442-453.
- [3] SINGH J, GU S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2596-2610.
- [4] DEMIRBAS M F. Biofuels from algae for sustainable development[J]. Applied Energy, 2011, 88: 1-8.
- [5] SU Y 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.
- [6] DE GODOS I, GUZMÁN H O, SOTO R, et al. Coagulation/flocculation-based removal of algal-bacterial biomass from piggery wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 923-927.
- [7] TRAN N H, BARTLETT J R, KANNANGARA G S K, et al. Catalytic upgrading of biorefinery oil from micro-algae[J]. Fuel, 2010, 89(2): 265-274.
- [8] 李华, 王伟波, 刘永定, 等. 微藻生物柴油发展与产油微藻资源利用[J]. 可再生能源, 2011, 29(4): 84-89.
LI hua, WANG Weibo, LIU Yongding, et al. The development of microalgae biodiesel and the utilization of oleaginous microalgae[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(4): 84-89.
- [9] WIJFFELS R H, BARBOSA M J, EPPINK M H M. Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels[J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2010, 4: 287-295.
- [10] PITTMAN J K, DEAN A P, OSUNDEKO O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 17-25.
- [11] LAM M K, LEE K T. Potential of using organic fertilizer to cultivate *Chlorella vulgaris* for biodiesel production[J]. Applied Energy, 2012, 94: 303-308.
- [12] CHAIKLAHAN R, CHIRASUWAN N, SIANGDUNG W, et al. Cultivation of *Spirulina platensis* using pig wastewater in a semi-continuous process[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010, 20: 609-614.
- [13] BHATNAGAR A, BHATNAGAR M, CHINNASAMY S, et al. *Chlorella minutissima*-a promising fuel alga for cultivation in municipal wastewaters[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, 161: 523-536.
- [14] 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: 23-31.
- [15] 傅晓娜, 姚刚. 微藻污水处理与生物质能耦合技术综述[J]. 绿色科技, 2011(11): 100-104.
FU Xiaona, YAO Gang. The review of microalgae coupling technology of waste water treatment with biomass energy[J]. Journal of Green Science and Technology, 2011(11): 100-104.

- [16] STURM B S M, LAMER S L. An energy evaluation of coupling nutrient removal from wastewater with algal biomass production[J]. Applied Energy, 2011, 88: 3499-3506.
- [17] ASLAN S, KAPDAN I K. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae[J]. Ecological Engineering, 2006, 28(1): 64-70.
- [18] KONG Q X, LI L, MARTINEZ B, et al. Culture of microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in wastewater for biomass feedstock production[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, 160(1): 9-18.
- [19] DOMENICO V, HERLINDA G V, GABRIEL C. Nitrogen removal and recycling by *Scenedesmus obliquus* in semicontinuous cultures using artificial wastewater and a simulated light and temperature cycle[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(3): 359-362.
- [20] TAM N F Y, WONG Y S. Effect of immobilized microalgal bead concentrations on wastewater nutrient removal[J]. Environmental Pollution, 2000, 107(1): 145-151.
- [21] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol[J]. Trends in Biotechnology, 2008, 26: 126-131.
- [22] WIJFFELS R H, BARBOSA M J. An outlook on microalgal biofuels[J]. Science, 2010, 329(5993): 796-799.
- [23] AHMAD A L, YASIN N H M, DEREK C J C, et al. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 584-593.
- [24] BRENNAN L, OWENDE P. Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2): 557-577.
- [25] 姜进举, 苗凤萍, 冯大伟, 等. 微藻生物柴油技术的研究现状及展望[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30(2): 134-140.
- JIANG Jinju, MIAO Fengping, FENG Dawei, et al. Research situation and prospect of microalgae biodiesel[J]. China Biotechnology, 2010, 30(2): 134-140.
- [26] JOHNSON M B, WEN Z. Development of an attached microalgal growth system for biofuel production[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2010, 85:525-534.
- [27] SCHECK P, THOMAS-HALL S, STEVENS E, et al. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production[J]. Bioenergy Research, 2008, 1(1): 20-43.
- [28] RODOLFI L, ZITTELLIV C G, BASSI N, et al. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 102(1): 100-112.
- [29] SOBCZUKA T M, CHISTI Y. Potential fuel oils from the microalga *Choricystis minor*[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2010, 85(1): 100-108.
- [30] DE LA PENA M R. Cell growth and nutritive value of the tropical benthic diatom, *Amphora* sp., at varying levels of nutrients and light intensity, and different culture locations[J]. Journal of Applied Phycology, 2007, 19(6): 647-655.
- [31] LI Y, HORSMAN M, WANG B, et al. Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 81(4): 629-636.
- [32] KARSEN M T, YOSHIDA T. Effect of salt concentration on intra-cellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae *Dunaliella* cells[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(3): 223-226.
- [33] LIU Z Y, WANG G C, ZHOU B C. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris*[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(11): 4717-4722.
- [34] MURADYAN E A, KLYACHKO-GURVICH G L, TSOGLIN L N et al. Changes in lipid metabolism during adaptation of the *Dunaliella salina* photosynthetic apparatus to high CO₂ concentration[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51(1): 53-62.
- [35] KHOTIMCHENKO S V, YAKOVLEVA I M. Lipid composition of the red alga *Tichocarpus crinitus* exposed to different levels of photon irradiance[J]. Phytochemistry, 2005, 66(1): 73-79.
- [36] KIM D G, LA H J, AHN C Y, et al. Harvest of *Scenedesmus* sp. with bioflocculant and reuse of culture medium for subsequent high-density cultures[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 3163-3168.
- [37] ZENG X, DANQUAH M K, CHEN X D, et al. Microalgae bioengineering: from CO₂ fixation to biofuel production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15: 3252-3260.
- [38] CHRISTENSON L, SIMS R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels and bioproducts[J]. Biotechnology Advances, 2011, 29: 686-702.
- [39] 胡洪营, 李鑫. 利用污水资源生产微藻生物柴油的关键技术及潜力分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 739-744.
- HU Hongying, LI Xin. Analysis of key techniques and production potential of biodiesel production based on microalgae with wastewater as resources[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(3): 739-744.
- [40] SINGH A, OLSEN S I. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels[J]. Applied Energy, 2011, 88: 3548-3555.
- [41] TREDICI M R. Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution[J]. Biofuels, 2010, 1: 143-162.
- [42] 唐小红, 常影, 黄和, 等. 微藻在CO₂生物捕集及废水生态修复领域的研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2011, 31(9): 124-131.
- TANG Xiaohong, CHANG Ying, HUANG He, et al. The advancement of CO₂ biological trapping and wastewater ecological recovery based on microalgae cultivation[J]. China Biotechnology, 2011, 31(9): 124-131.
- [43] HUANG C C, HUNG J J, PENG S H, et al. Cultivation of a thermo-tolerant microalga in an outdoor photobioreactor: Influences of CO₂ and nitrogen sources on the accelerated growth[J]. Bioresource Technology, 2012, 112: 228-233.
- [44] KUNJAPUR A M, ELDRIDGE R B. Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2010, 49 (8): 3516-3526.
- [45] SINGH A, SINGH P N, MURPHY J D. Mechanism and challenges in commercialization of algal biofuels[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 26-34.
- [46] OLGUÍN E J. Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery[J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(5): 1031-1046.
- [47] 胡洪营, 李鑫, 杨佳. 基于微藻细胞培养的水质深度净化与高价值生物质生产耦合技术[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1122-1127.
- HU Hongying, LI Xin, YANG Jia. Coupling of wastewater deep purification and high quality biomass production based on microalgae cultivation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(3): 1122-1127.
- [48] PARK J B K, CRAGGS R J, SHILTON A N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 35-42.

- [49] CHO S, LUONG T T, LEE D, et al. Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(18): 8639-8645.
- [50] JIANG L L, LUO S J, FAN X L, et al. Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(10): 3336-3341.

Recent advance on sewage-microalga-biofuel coupling technology

CAI Zhuoping^{1,2}, DUAN Shunshan², ZHU Honghui^{1*}

1. Guangdong Institute of Microbiology, Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, State Key Laboratory of Applied Microbiology (Ministry-Guangdong Province Jointly Breeding Base), Guangzhou 510070, China;

2. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract: Water crisis and energy crisis are challenging the sustainable development of human society unprecedentedly. Microalgae are featured by their eco-physiological functions and merits, and they can be used to purify sewage and produce biofuel. In this paper, the removal of nitrogen and phosphorus in sewage by microalgae, its mechanism and affecting factor, the production of biofuel from microalgae, accumulation of lipid and influencing factors are summarized. Besides, a coupling technology mediated by microalgae for removing nitrogen and phosphorous in sewage and producing biofuels is proposed based on the unique feature of microalgae. This coupling technology aims to provide nutrients by growing microalgae in sewage, hence to reduce the cost for the growth of microalgae. In addition, this promising technology is low cost but efficient, which is necessary for co-solving the crisis water shortage and energy depletion. After the core concepts and bases of the sewage-microalga-biofuel coupling technology are introduced, several key processes involved in the technology such as screening of microalgae species, optimization of photobioreactor, improvement of coupling system and exploitation of high-value intercellular substances are presented. Finally, developmental tendency and perspective of the coupling technology are put forward. The sewage-microalga-biofuel coupling technology is helpful in resolving the water crisis and energy crisis, which is significant in the sustainable development of society, economy, resource and environment.

Key words: sewage; microalga; biofuel; coupling technology