

Research Progress of Algae Cultivation and Utilization*

Buhui Chang, Lan Li, Lei Yao

School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan
Email: changbuhui@163.com

Received: Dec. 7th, 2012; revised: Dec. 24th, 2012; accepted: Dec. 29th, 2012

Abstract: More than half a century, with the development of various of biological cultivation system, people have done a lot of improvements and structural innovation around the process of using the bioreactor to optimize the environments of biological reaction processes. There are also have a lot of breakthroughs in the development of special reactors on the basis of the existing reactor structure. This article mainly focuses on the structure and the advantages and disadvantages of the closed and open cultivation system at home and abroad, meanwhile, achieve the cultivation of bio-energy biomass. Summarized the utilization of algae, provided the necessary reference for the future realization of the ecological chain cycle, waste water, waste gas-algae absorption and utilization-algae reuse.

Keywords: Closed Algae Cultivating System; Open Algae Cultivating System; Algae Utilization

藻类培养与利用研究进展*

常布辉, 李 兰, 姚 磊

武汉大学水利水电学院, 武汉
Email: changbuhui@163.com

收稿日期: 2012年12月7日; 修回日期: 2012年12月24日; 录用日期: 2012年12月29日

摘 要: 半个多世纪以来, 随着各类生物培养系统的发展, 人们紧紧围绕着生物反应器为生物过程提供最优化反应环境而对其进行了大量的改进和结构上的创新, 在现有反应器结构基础上开发特殊的反应器也取得了一定的突破。本文重点介绍了国内外密闭式与开放式培育系统的结构与优缺点, 同时实现生物能源生物质的培育。对藻类利用进行了总结, 为将来实现以废水、废气-藻类吸收利用-藻类再利用为循环的生态链条的实现提供必要的参考。

关键词: 密闭式藻类培育系统; 开放式藻类培育系统; 藻类利用

1. 前言

随着社会经济与科技的发展、人口的增加、资源的枯竭、环境与气候的恶化, 人类社会面临着前所未有的难题——资源、能源、人口、环境、土地等的压力日益加剧。为了满足日益增长的各方面的需求, 人们加大了

在能源、食物等方面的研究。藻类以其独特的生态特征和生活习性成为了研究的热点, 人们针对其不同的用途进行了大量的研究, 并取得了丰富的成果。

藻类分布的范围非常广, 生长繁殖快, 对环境的要求不严, 适应性极强。从热带到两极, 从积雪的高山到温热的泉水, 从潮湿的地面到不很深的土壤内, 几乎到处都有藻类分布。另外藻类中含有大量的蛋白质、油脂、糖类、色素以及各种维生素等, 具有很大的应用前景。

*基金项目: 水利部“948”项目: 日本碳纤维生态草河湖直接净化技术的引进及研发(编号: 201112)。

作者简介: 常布辉(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水资源水环境。

目前用于培养藻类的光生物反应器主要可以分为开放式、密闭式和混合式。不同的研究者针对不同的藻类、不同的用途开发了不同的培养方式。研究初期,为了解决粮食的短缺问题,人们主要是以开放式的培养方式获得藻类。然而随着研究的深入和科技的进步,为了解决开放式培育系统的缺点,实现高密度培养,密闭式光生物反应器得到了广泛的发展。但是由于密闭式光生物反应器操作及运行成本高等问题,密闭式光生物反应器一直没有得到大规模的利用。加之近些年来,水体污染加剧和迫于低碳减排的压力,人们发现开放式的藻类培育系统在降低成本,低碳减排和废水利用方面有着不可比拟的优势。

然而针对于藻类培养系统的多元化利用还不多,因此分析基于不同目标的藻类培养系统对于藻类的利用发展和将来藻类培育的发展方向的确定具有重要的意义。

2. 光生物反应器

藻类中含有丰富的蛋白质、油脂、糖类、色素等可供人类利用,加之藻类本身适应环境的能力极强,繁殖速度快,占地面积小等优势使得藻类在解决资源枯竭、人口压力、环境污染等方面具有独特的优势。产油藻作为生物燃料的原料,成为可以满足不断增长的能源需求的一条解决途径;藻类提供的营养物质可以有效的缓解人口和土地方面的压力;在水环境方面,藻类可以用来净化水质,治理水体污染。

虽然藻类极强的适应能力,对于藻类的自然生长并不需要创造特别的环境,但是为了能够满足特定的目标,例如提高微藻中蛋白质、色素等的含量,就必须有效的控制环境中氮磷比例、温度、培养液浓度、PH值等要素。大量的试验研究工作表明,不同的培养条件(光照强度、氮、磷等)对藻类培养的影响也不同。藻类种类不同,对光照强度的需求也不同;对于不同的环境,藻类本身的繁殖速度也有很大的差异^[1]。根据藻类对环境因素的敏感性,人们设计出了不同的培养方式,然而它们都不可避免的具有各自特有的和共同的优缺点。

2.1. 密闭式光生物反应器

目前密闭式光生物反应器主要有:管道式、平板

式、鼓泡式、气升式、搅拌式、薄膜袋式等。其共同的优点主要有:适宜于藻类生长繁殖的环境要素易于控制,可以使得藻类在其最佳的环境中进行快速的繁殖,因为是密闭的环境,因此外界生物入侵的概率也极低;生产率与可靠性都比较高。其缺点是结构复杂;材料要求较高;建造与运行的费用相对较高;能耗高;同时也需要不断的通入CO₂以此提供碳源,增加了大气中的碳排放等。下面简要介绍了几种主要的应用范围广泛的密闭式光生物反应器。

2.1.1. 搅拌式光生物反应器

机械搅拌式生物反应器广泛用于大规模培养微生物,它也被用于培养藻细胞和植物细胞,其中光源可以分为内置光源和外置光源两种方式。除了要确保适于微藻快速生长的光照强度、温度、PH值、通气量等环境因素外,由于微藻细胞的细胞壁很脆弱,搅拌产生的剪切力很容易伤害到细胞,因此桨型设计和搅拌转速也是影响反应器效率重要因素。在特定的环境条件和转速下,投料时间点和投料量都会影响微藻的培养效率。在反应器中营养物质丰富或者缺乏时进行投料都会降低微藻的生长速度。基于经济成本考虑,在微藻数量呈指数增长时期,持续性的小量剂的投料,使培养液的浓度维持在其实东都的1/3或1/2时最有利于微藻的快速增长^[2-4]。

2.1.2. 气升式光生物反应器

气升式反应器是在鼓泡式反应器的基础上发展起来的一种新型反应器,可以分为柱状气升式、内导流气升式反应器、外导流气升式反应器、磁悬浮气升式光生物反应器等。影响反应器特性的因素有很多,主要分为结构参数(反应器和导流筒直径、长径比、气液分离区的型式、底部封头型式、气体分布器型式及进气方式、内构件的型式及结构等)、气液体系的物理性质(气液体系的密度、粘度、表面张力、气泡直径等)及操作参数(气液表观速度、气液比、压力、温度)等,各参数间相互影响,导致放大较困难^[5-11]。与鼓泡式反应器相比,气升式反应器有利于反应物之间的混合、扩散、传热和传质,但平均气含率比较小。而与机械搅拌式反应器相比,气升式反应器则具有结构简单、造价低、易清洗维修、不易染菌、能耗低和剪切应力小等优点^[12]。

2.1.3. 管道式光生物反应器

管道式光生物反应器主要由直径比较小的硬质塑料、玻璃或者有机玻璃制成的水平或者倾斜的管道组成。利用自热光或者人造光源提供能量, 利用泵提供动力, 从而实现自动化循环培养。管道式光生物反应器起源于上世纪五十年代, 随着不断发展, 管道式光生物反应器由水平或倾斜放置的单层发展到了多层, 再到 α -斜管和多层螺旋式放置, 以此提高光能利用效率^[13]。管道式光生物反应器的一个关键技术就是防止藻类在管壁上的积累。藻类在管壁上附着生长, 加剧了光照的衰减, 从而使得管道内部的藻液不能获得足够的光照^[14]。管道式光生物反应器是目前应用最为广泛的密闭式光生物反应器。

2.1.4. 平板式光生物反应器

平板式光生物反应器结构简单, 通过调节放置角度以便使其获得最佳的取光效果, 反应器的组成材料容易加工制造, 可以根据需要设计不同的光径以及操作条件^[15]。对于不同的平板式光生物反应器而言, 在相同的培养条件下, 不同的光径也会产生不同的影响^[16,17]。由此看出, 对于平板式光生物反应器而言, 光径的影响也是不容忽视的。平板式光生物反应器凭借其结构简单, 操作便捷, 光径短等优点成为了藻类培养中比较理想的培养器, 随着其不断的发展, 已经由起初的单一培养发展到了半连续、连续多单元培养。

对于高纯度、环境适应能力与种群竞争能力较弱的藻类更适宜在能够有效控制环境条件的密闭式光生物反应器中培养。因此密闭式的光生物反应器在藻类高密度培养、发酵、基因生物工程和医药工业等高精度产业领域的利用具有独有的优势。

2.2. 开放式藻类培养系统

所谓的开放式反应器就是开放池培养系统, 具有技术简单、投资低廉、建设容易和操作简便等优点。主要类型有: 天然浅水池塘和人工跑道池式。其中最典型, 应用最广的开放池培养系统是 Oswald(1969)设计的跑道池反应器。以自然光作为光源和热源, 泵的动力作为动力设备实现藻液的循环、混合、防止微藻沉淀和提高微藻的光能利用效率。由于开放式跑道池不是封闭系统, 因此对对环境要素控制能力差, 难以维持藻类快速生长的恒定温度、培养水体的蒸发、外

来物种的入侵导致培养藻类不纯、适宜藻类繁殖的光照难以控制、对于 CO₂ 的吸收利用很有限。藻类细胞中 50% 是由碳组成的, 因此 CO₂ 在藻类的培养过程中起着至关重要的作用^[18], 提高 CO₂ 的吸收效率成为了提高培养池效率的关键因素之一^[19]。

2.2.1. 稳定塘技术

早在 1957 年 Oswald 等人就提出了利用藻类去除污水中的氮、磷营养物以及释放氧气供微生物新陈代谢利用。以人工模拟的水体藻菌共生自净原理为基础的稳定塘技术在研究的前期得到了广泛的发展。稳定藻塘主要包括好氧塘、厌氧塘、兼性塘、曝气塘等多种类型。稳定藻塘技术主要利用悬浮藻类、细菌微生物、水生植物、水生动植物等构成的生态系统进行水体净化, 其中微生物占据了主要地位^[20]。稳定藻塘技术中悬浮藻类的密度有限, 而且大面积的藻类会封闭水面, 造成水体缺氧, 因此对水体的污染物的吸收有限^[21]。

2.2.2. 高效藻塘技术

相对于稳定藻塘而言, 高效藻塘技术中池塘的水深更浅, 池塘多呈带状, 宽度更窄, 这样的结构更有利于藻类的生长。高效藻塘技术的研究已经达到了相当成熟, 而且有很多的应用实例。其多用于处理农业、工业及生活污水, 效果显著^[22,23]。然而悬浮藻类对于水体空间的利用率不高, 只能生存在接近水面的一定深度的水层上(一般为 12~15 cm), 只能增加污水停留时间才能达到一定程度的处理标准, 而且处理过后的水体中会含有随水流迁移的悬浮藻类, 处理成本较高。另外还要通入一定量的 CO₂, 又会将污染的风险转移到了大气中, 并不能从整体上解决问题。

为了防止藻类细胞沉降; 消除温度分层; 加速营养物质、CO₂ 在培养液中的均匀分布; 去除光合作用产生的氧气; 提高光能利用效率等, 高效藻塘技术中利用桨轮提供动力进行搅拌。然而传统的搅拌式不能高效的利用光照, 湍流范围有限^[24]。为了提高光能利用效率, 就必须减少池深, 或者降低培养密度。培养成功的关键是在尽可能低的能耗基础上维持培养液的有效混合和一定的流动速度。另外该系统还需要通入 CO₂, 用于提供和传输 CO₂ 的投资却几乎占据了整个培养系统成本的 1/3^[25]。但是培养液中 CO₂ 的浓度

并不能保持稳定在藻类生长的最佳浓度, 并且还有一部分 CO_2 进入大气。人们一直致力于寻找能够减少操作和投资成本的方法。就目前而言, 通过提高能源利用效率是一个能够降低操作和投资成本的方法。特别是在发夹式的弯道处, 能量损失最为严重, 而且不合理的设计还会造成局部培养液停滞。

2.2.3. ATS 系统

ATS 系统是一种新的利用纤维状着生藻类处理污水、过滤水体的技术。它可以高效的吸收大气中的 CO_2 , 水体中的营养盐、污染物和重金属等, 同时有效的增加水体中的溶解氧含量, 提高水体的 PH 值等。其整体结构简图见图 1^[26]。ATS 系统已经成功用于处理农业废水、生活污水、工业废水^[27]。污水通过水泵流经藻屏, 高浓度的藻群和微生物可以有效和快速的吸收水中的有机物质, 将水体中的 N、P 等有机物摄入细胞内, 转化为藻类的细胞组织。同时, 藻类的光合作用为异养菌提供氧气用于对废水中的物质进行需氧分解。污水中的污染物通过吸收、吸附、过滤和

沉淀等过程而得到去除。周期性地对藻类进行收获, 既可去除过密积累的藻类细胞, 亦可带走部分连带的污染物。以此达到去除水体中多余营养盐的目的, 改善水质。

在大规模的实际应用中的 ATS 系统中, 动力成本大大降低, 加之对藻类生物量的利用, ATS 系统的成本问题就得到了有效的解决。据美国农业部农业研究服务中心的新闻发布会披露, ATS 系统对畜牧场废水中氮的去除率为 60%~90%, 对磷的去除率为 70%~100%。ATS 系统中的着生藻类耐污性强, 对 N、P 去除效果好, 在处理效果上, 着生藻类系统与高效藻塘技术基本相当, 但着生藻类在生物量的收获上占据明显优势; 与人工湿地相比, ATS 系统可以达到长期的稳定的去氮除磷效果, 这是人工湿地所不能达到的。并且着生藻类也不会随水流迁移。因此, ATS 处理系统在污水的三级处理或富营养化湖泊水的防治方面具有较大的应用潜力。图 2 所示, 实际应用中的 ATS 污水处理系统, 可以看到工人拉起的藻屏。

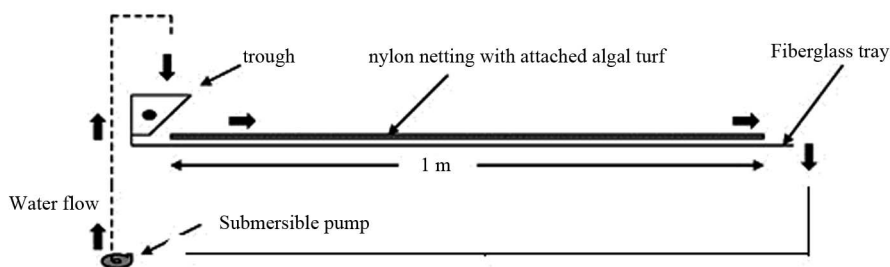


Figure 1. The diagram of ATS system
图 1. ATS 系统简图



Figure 2. The biggest ATS sewage treatment system in California (from the United States, Hydromentia Corporation)
图 2. 美国加利福尼亚最大的 ATS 污水处理系统(摘自美国, Hydromentia 公司)

2.2.4. 碳纤维 - 藻场技术

ACF 是随着碳纤维工业发展起来的一种新型碳材料, 在高性能碳纤维研究的基础之上, 于 60 年代初研制成功是继粉状活性炭(PAC)和颗粒活性炭(GAC)之后的第三代活性炭产品。

ACF 是在碳纤维基础上碳化、活化而来, 它具有传统活性炭所不具有的优点: 1) 强大的比表面积; 2) 孔径分布窄, 有效吸附微孔口多, 且直接表露在纤维表面; 3) 吸附行程短; 4) 易成型, 不易粉化, 在振动条件下不会变松动或过分密实; 5) 再生容易且速度快, 使用寿命长; 6) 有些 ACF 具有生物亲和性; 7) 对低浓度吸附质, 即使是痕量级吸附质, 仍保持有很高的吸附量。8) ACF 可以吸附重金属离子, 还对一些贵金属离子具有较高的氧化还原能力^[28]。因此, ACF 的吸附能力较传统活性炭强, 并且有更好的应用性能。据研究, ACF 的吸附容量较传统活性炭大 1~10 倍, 吸附和脱附速率较传统活性炭快 100 倍。

2011 年武汉大学的李兰教授在东湖建立了水利部“948”项目碳纤维水质净化示范工程, 主要开展日产和国产碳纤维净水产品富营养化控制对比试验。试验区面积共 2800 m², 其中日本碳纤维净水产品试验区面积大约 1800 m², 李兰教授负责的课题组自己开发的碳纤维净水产品试验区面积大约 1000 m²。两试验区经过半年试验水质达到地面水 II 类标准, 2 个月时间形成大型刚毛藻藻场, 8 个月后形成微生物、着生藻类与水草共生的生物群体。

碳纤维净水产品的主要材料是经过表面改性微生物亲和性增强的 PAN 基活性炭纤维(CF)。为了达到

最佳的水质净化效果, 适应不同的水体环境条件, 必须对放入水中的碳纤维进行结构设计。鉴于此设计出了针对于底泥和不同水层的净水产品。其中主要包括悬挂式、上浮式、框架式等。其中悬挂式是通过绳索将一束束碳纤维悬挂于水体中, 下面通过坠子保持碳纤维在水中不会任意浮动; 上浮式是将碳纤维束固定于置于水底的平面框架上, 上端固定有浮筒, 平面框架上固定有碳纤维布, 既可以防止框架陷入底泥中, 又可以吸附底泥中的污染物、重金属等, 防止底泥中释放的污染物质或者营养盐进入水体; 框架式主要作用作为悬挂式中绳索的着力点, 起固定作用, 并且框架中间的空间也有一定数量的碳纤维束。这样的设计可以对水体中不同水层中的水体进行全方位的净化处理, 以此达到水体自净的生态修复的目的。

碳纤维水质净水原理主要是利用藻类进行水体修复。可以分为两个阶段。第一个阶段主要是吸附阶段, 第二个阶段是藻场形成阶段(见图 3)。在碳纤维产品布置后, 经过连个阶段的处理, 示范区内水体中 TN 和 TP 的含量出现了明显持续性的下降。TN、TP 的去除率最高可达 97.2% 和 92%。

就目前的研究表明, 碳纤维 - 藻场技术可以生成大量的藻类且纯度高达 90% 以上, 通过藻类有效的去除水体中的氮、磷等, 防止水体富营养化, 快速的修复水体, 在藻类培养、湖泊富营养化控制中具备很大的潜力。碳纤维 - 藻场水质净化技术较 ATS 系统具备成本更低、能耗更低、寿命更长、管理技术更简单等优点。但是碳纤维用于自然水体修复的研究还处于初级阶段, 理论研究和大规模的使用还不多。



Figure 3. The algae field in the demonstration region
图 3. 示范区形成的藻场

3. 藻类利用研究

藻类在医学、农业、工业、环境等方面的用途非常广泛,针对藻类的研究已经有了相当长的历史。无论是密闭式或者开放式的藻类培养系统,都会培育出大量的藻类,培养的藻类可以作为优质的原料加以利用。另外,对于藻类利用研究是降低培养系统成本和增加收益的最有效的途径。下面就对藻类利用的研究做了总结。

3.1. 制作家禽饲料、鱼类的饵料和营养食品

藻类是一种营养价值很高的优质饵料,可以提高喂养动物的免疫力。用于育苗,可以降低育苗成本,提高幼体的免疫力和成活率。目前,角毛藻、盐藻、小球藻、金藻和底栖藻类硅藻等均已成功地直接或间接地被用作家禽的饲料,鱼类和人工培养的浮游动物(如红虫、牡蛎等)的饵料^[29]。随着海水养殖业和加工业的迅速增长,对藻类饵料的需求量也迅速增加。其中微藻的蛋白质含量较高,所含核酸超过常规饲料和食品。蛋白含量超过60%,是单细胞蛋白(SCP)的一个重要来源。螺旋藻的蛋白质含量在所有天然食物中最高,可达60%~70%,是大豆的2倍、鸡肉的3倍、牛肉的3倍、猪肉的4倍、鸡蛋的6倍、大米的10倍^[30]。生物学产量高于任何作物。藻类蛋白的生产正在迅速发展,小球藻、栅列藻、新月藻、螺旋藻、杜氏藻已被用作蛋白质来源,小球藻、螺旋藻、杜氏盐藻还以粉剂、丸剂、提取物等形式投放保健品市场或用作食品添加剂。随着世界人口的不断增长,耕地不断减少的情况下,提供足够的蛋白质日益成为一个严峻的问题。因此利用藻类培养提供高质量蛋白质具有深远的意义。

3.2. 提取色素、维生素、多糖、不饱和脂肪酸等

藻类生长周期短、耐受性的基因是生物技术关注的热点,利用藻类蛋白生产口服疫苗等,用活性物质制成干粉。微藻中所含的维生素A、维生素E、硫氨酸、核黄素、维生素B12、维生素C、生物素、肌醇、叶酸、泛酸钙和烟酸等增加了其作为单细胞蛋白(SCP)的价值。藻类基因工程亦称藻类遗传工程或藻类重组DNA技术,是以海藻为研究对象将某种生物基因通过基因载体或其他手段运送到藻类活细胞中,并使之增

殖(克隆)和行使正常功能(表达),从而创造出藻类新品种的遗传学技术^[31]。一方面通过植入的基因改造出特定的藻类,增强藻类的生长优势或者增加蛋白质、维生素、色素等含量,通过高密度培养获得大量的次级代谢生物物质。另一方面可以从藻类中提取具有出重要经济意义的基因,用于改良农作物或者微生物。王义琴^[32]等人将防御素基因转入椭圆小球藻细胞内,生产昂贵的防御素已取得一定的成果,但仍有一个巨大的未知藻类待人们去开发。

许多藻类能产生对其它藻类、病毒、细菌、真菌和原生动物的毒性作用的抗微生物化合物。这些化合物大多为有机酸、脂肪酸、溴酚及其它酚类抑制剂、丹宁、类萜,多糖及醇类^[33]。可以用以提取抗生素、毒素和高不饱和脂肪酸。

多元不饱和脂肪酸是人与动物生长发育所必需的脂肪酸。目前多元不饱和脂肪主要从鱼油中提取,但是胆固醇含量高,有腥味,质量不高,产量也很有限。然而占海洋生物40.86%的海藻的油脂中含有大量的脂肪酸,因此可以通过生物工程方法进行微藻高密度培养^[34],然后通过控制环境条件提高多元不饱和脂肪酸在海藻中的富集,进而实现不饱和脂肪酸的大量高品质生产。近些年对不饱和脂肪酸特别是二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)在保健品中的使用都深受人们的欢迎,其对防治心脏疾病、动脉硬化、癌症、风湿关节炎、哮喘和糖尿病等人类疾病有明显效果,已成为研究开发的热点。而鱼类体内大多数不饱和脂肪酸大都来源于海藻的积累^[35]。微藻胶体(ECP)有较强的抗肿瘤活性,同样也引起了国内外专家的关注。

藻类合成的色素主要有叶绿素、类胡萝卜素和藻胆蛋白等三大类,可以作为天然色素和营养物质。藻类中含有大量的天然顺式 β -胡萝卜素,含量高达14%。可用于防治癌症、抗辐射、延缓衰老,增强机体免疫力等生理作用,尤其对萎缩性胃炎、口腔溃疡、皮肤疾病和化疗患者有着明显的辅助治疗效果。然而目前人类用的最多的事化学合成的反式的 β -胡萝卜素,对人体有致癌、致畸的作用,而顺式异构体在抗癌、抗心血管疾病功能比全反式异构体高。

3.3. 作为生物燃料

藻类中富含的酯类和甘油是制备液体燃料的良

好原料。藻类热解制备的生物质燃油热值高, 是木材或农作物秸秆的 1.4~2 倍。在世界能源消耗中, 生物质能已占 14%。将微生物和微藻混合培养, 生产高纯度的乙醇、甲醇、丁烷等能源化合物, 微藻最大的可利用之处在于其干细胞中含油 70% 以上, 是合成生物柴油的最佳原料, 是理想的可再生能源。藻类中油脂含量高达其自身重量的 50%, 单位面积上藻类的产油量大约为 20,000~80,000 升每英亩, 这一数字是最好的农作物产油量的 7~31 倍^[36,37]。而藻类本身油脂含量的不同是由培养的环境条件所导致的。2011 年 M. Odlare^[38]等人在前人的基础上提出了非接种藻类培养, 对藻类利用的地域适应性进行了研究。利用当地优势藻类做为藻类培养的对象, 以满足当地的能源需求。微藻可以大量积累脂类及碳水化合物。随着石油等能源的日益枯竭, 利用微藻开发新能源已成为 21 世纪新能源建设的一大趋势。

4. 面临的挑战与发展趋势

在藻类培育利用的初期, 由于科技水平不高, 检测手段短缺等原因, 结构简单、操作简便的开放式培养系统得到了一定程度的发展, 为藻类培养奠定了基础。然而随着研究的深入, 各个高精度研究领域对于藻类培养的需求促使了密闭式的光生物反应器的迅速发展。精密化、规模化、自动化成为了人们研究的热点方向, 这给藻类产品的生产带来质和量上的飞跃。

开放式的藻类培育系统的研究与综合利用在国外已经开展了大量的应用实践研究, 然而在国内还缺乏相关研究和大规模的应用。

藻类培养与利用是相辅相成的, 然而对于开放式藻类培育系统的研究还缺乏成熟的理论和大量的实践经验。同时, 藻类利用的研究也远远滞后于藻类的培养, 这就在一定程度上阻碍了藻类培养的发展。加快藻类利用的研究, 产生尽可能大的利益是进一步促进藻类培养研究的主要驱动力。

参考文献 (References)

[1] FRIES, L. On the cultivation of axenic red algae. *Physiologia Plantarum*, 1963, 16: 695-708.
 [2] 陈必链, 梁世中, 王娟, 等. 搅拌式光生物反应器培养紫球藻的条件优化[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2004, 20(2):

91-96.
 CHEN Bilian, LIANG Shizhong, WANG Juan, et al. Optimization cultural conditions of porphyridium cruentum in the stirred photobioreactor. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science)*, 2004, 20(2): 91-96. (in Chinese)
 [3] CHEN Siye, QIH Anshi. Photolithotrophic cultivation of lamnaria japonica gametophyte cells in stirred tank photobioreactors studies in different pulse feeding modes. *中国生物工程杂志*, 2008, 28(1): 36-43.
 [4] MOO-YOUNG, M., CHISTI, Y. and VLACH, D. Fermentation of cellulosic materials to mycoprotein foods. *Biotechnology Advances*, 1993, 11: 469-479.
 [5] 张立英, 黄青山. 气升式环流反应器的理论研究进展[J]. 过程工程学报, 2011, 11(1): 162-173.
 ZHANG Liling, HUANG Qingshan. Research progress in the modeling theory of airlift loop reactor. *The Chinese Journal Process Engineering*, 2011, 11(1): 162-173. (in Chinese)
 [6] 徐志标, 裴鲁青, 骆其君, 等. 气升式光生物反应器内外径比对球等鞭金藻生长的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2004, 17(4): 406-409.
 XU Zhibiao, PEI Luqing, LUO Qijun, et al. Effect of airlift photobioreactor's diameter ratio of inner tube to outer tube on the growth of isochrysis galbana. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2004, 17(4): 406-409. (in Chinese)
 [7] 刘伟娜, 吴垠, 徐哲, 等. 气升式光生物反应器培养微藻溶氧和 pH 值变化规律研究[J]. 渔业现代化, 2008, 35(2): 6-10.
 LIU Werna, WU Gen, XU Zhe, et al. The change of dissolved oxygen and pH of the marine microalgae cultivation in air-lift photobioreactor. *Fishery Modernization*, 2008, 35(2): 6-10. (in Chinese)
 [8] ZITTELLI, G. C., RODOL, L. and TREDICI, M. R. Mass cultivation of Nannochloropsis sp. in annular reactors. *Journal of Applied Phycology*, 2003, 15: 107-114.
 [9] 康瑞娟, 蔡昭铃, 施定基. 用于微藻培养的气升式光生物反应器[J]. 化学反应工程与工艺, 2001, 17(1): 44-49.
 KANG Ruijuan, CAI Zhaoling and SHI Dingji. An airlift photobioreactor for microalgae cultivation. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2011, 17(1): 44-49. (in Chinese)
 [10] 江田民, 杨海光, 陈筛林, 等. 气升式环流生物反应器处理废水厌氧过程研究[J]. 化工环保, 2004, 24(3): 157-160.
 JIANG Tianmin, YANG Haiguang, CHEN Shailin, et al. Study on anaerobic process in air-lift loop bioreactor for wastewater treatment. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2004, 24(3): 157-160. (in Chinese)
 [11] KASTANEK, F., SABATA, S., SOLCOVA, O., et al. In-field experimental verification of cultivation of microalgae *Chlorella* sp. using the flue gas from a cogeneration unit as a source of carbon dioxide. *Waste Management & Research*, 2010, 28(11): 961-966.
 [12] 赵东胜, 刘桂敏, 赵艳丽, 等. 气升式反应器研究进展[J]. 化工进展, 2007, 26(6): 810-813.
 ZHAO Dongsheng, LIU Guimin, ZHAO Yanli, et al. Research progress of airlift reactor. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2007, 26(6): 810-813. (in Chinese)
 [13] 刘娟妮, 胡萍, 姚领, 等. 微藻培养中光生物反应器的研究进展[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 772-777.
 LIU Juanni, HU Ping, YAO Ling, et al. Advance of photobioreactor on microalgal cultivation. *Food Science*, 2006, 27(12): 772-777. (in Chinese)
 [14] 刘小澄, 刘永平. 管道式光生物反应器的设计和性能[J]. 生命科学, 2010, 22(5): 492-498.
 LIU Xiaocheng, LIU Yongping. Tubular photobioreactor design and performance. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2010, 22(5): 492-498. (in Chinese)
 [15] 许波, 王长海. 微藻的平板式光生物反应器高密度培养[J]. 食品与发酵工业, 2003, 2(1): 36-40.
 XU Bo, WANG Changhai. High density culture of microalgal

- cells in flat plate photobioreactor, high density culture of micro-algal cells in flat plate photobioreactor. *Food and Fermentation Industries*, 2003, 2(1): 36-40. (in Chinese)
- [16] 游文朗, 陈必链, 王娟. 平板式光生物反应器中紫球藻培养条件的优化[J]. *植物资源与环境学报*, 2006, 15(1): 30-33.
YOU Wenming, CHEN Bilian and WANG Juan. Optimization of culture conditions of *Porphyridium cruentum* in the flat plate photobioreactor. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2006, 15(1): 30-33. (in Chinese)
- [17] 潘曰磊, 邹宁, 梁妍, 等. 山东地区采用光生物反应器进行大规模螺旋藻培养探讨[J]. *现代农业科技*, 2008, 20: 234-237.
PAN Yuelei, ZHOU Lei, LIANG Yan, et al. The investigation of mass *Spirulina* cultivation using photobioreactor in Shandong province. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2008, 20: 234-237. (in Chinese)
- [18] ROUND, F. E. *The biology of the algae*. 2nd Edition, London: Edward Arnold, 1973.
- [19] SU, Z. F., KANG, R. J., SHI, S. Y., et al. An economical device for carbon supplement in large-scale micro-algae production. *Bio-process and Biosystems Engineering*, 2008, 31: 641-645.
- [20] 马沛明. 利用着生藻类去除 N、P 营养物质的研究[D]. 中国科学院研究生院, 2005.
Ma Peiming. Study on nitrogen and phosphorus removal with attached algae. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- [21] OSWALD, W. J., GOTAAS, H. B. Photosynthesis in sewage treatment. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1957, 122: 73-105.
- [22] MUTTAMARA, S., PUETPAIBOON, U., MARA, D. D., et al. Nitrogen removal in baffled waste stabilization ponds. *Water Science and Technology*, 1999, 33: 173-81.
- [23] PICOT, B., EL HALOUANI, H., CASELLAS, C., et al. Nutrient removal by high rate pond system in a Mediterranean climate (France). *Water Science and Technology*, 1991, 23: 1535-1541.
- [24] KETHEESAN, B., NIRMALAKHANDAN, N. Development of a new airlift-driven raceway reactor for algal cultivation. *Applied Energy*, 2011, 88: 3370-3376.
- [25] BENEMANN, J. *Microalgae biotechnology*. *Trends in Biotechnology*, 1987, 5(2): 47.
- [26] MULBRY, W., KANGAS, P. and KONDRAD, S. Toward scrubbing the bay: Nutrient removal using small algal turf scrubbers on Chesapeake Bay tributaries. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 536-541.
- [27] ADEY, W. H., LOVELAND, K. *Dynamic aquaria: Building living ecosystems*. 2nd Edition, New York: Academic Press, 1998: 498.
- [28] 李裕, 周启高. 碳纤维(CF)——一种有广阔前景的新材料[J]. *五金科技*, 1998, 26(4): 22-24.
LI Yu, ZHOU Qigao. Carbon fiber (CF)—A new materials with broad prospects. *Hardware Technology*, 1998, 26(4): 22-24. (in Chinese)
- [29] 高延耀. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
GAO Yanyao. *Water pollution control engineering*. Beijing: Higher Education Press, 1999. (in Chinese)
- [30] 周淑荣, 李沐森. 螺旋藻的营养保健功能及其开发利用[J]. *特产研究*, 2001, 2: 63-65.
ZHOU Shurong, LI Musen. *Spirulina nutrition and health function and its development and utilization*. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2001, 2: 63-65. (in Chinese)
- [31] 陈颖, 李文彬, 孙勇如. 藻类基因工程及其展望[J]. *世界农业*, 1998, 16(6): 30-32.
CHEN Ying, LI Wenbin and SUN Yongru. Genetic engineering of algae and future prospects. *World Agriculture*, 1998, 16(6): 30-32. (in Chinese)
- [32] 王义琴, 陈颖, 白琴华, 等. 以小球藻为载体生产兔防御素的研究[D]. 中国科学院上海冶金研究所, 2000.
WANG Yiqin, CHEN Ying, BAI Qinhu, et al. Using transgenic *Chlorella ellipsoidea* as Bio-reactor to produce rabbit defensin. Shanghai Institute of Metallurgy of Chinese Academy of Science, 2000. (in Chinese)
- [33] 王长海. 微藻与微藻生物技术[J]. *渔业现代化*, 2006, 1: 20-22.
WANG Changhai. Micro algae and micro algae biological technology. *Fishery Modernization*, 2006, 1: 20-22. (in Chinese)
- [34] 吴庆, 蔡昭玲, 丛威, 等. 从微藻中提取多不饱和脂肪酸[J]. *北京化工大学学报*, 2004, 31(4): 5-8.
WU Qing, CAI Zhaoling, CONG Wei, et al. A primary study on the extraction and enrichment of the PUFAs from algae. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2004, 31(4): 5-8. (in Chinese)
- [35] 齐藤洋昭. 水产动物中的DHA分布[J]. *食品工业*, 1993, 36(14): 33-43.
SAITO Yangchao. DHA distribution in aquatic animals. *Food Industry*, 1993, 36(14): 33-43. (in Chinese)
- [36] DEMIRBAS, A., DEMIRBAS, M. F. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52: 163-170.
- [37] RIBÉ, V., THORIN, E., GAVARE, M., et al. Cultivation of algae with indigenous species—Potentials for regional biofuel production. *Applied Energy*, 2011, 88: 3280-3285.
- [38] OSWALD, W. J. Productivity of algae in sewage disposal. *Solar Energy*, 1973, 1(3): 107-117.