

微藻生物技术产业前景和研发策略分析

李健^①, 张学成^②, 胡鸿钧^③, 王广策^{④*}

① 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457;

② 中国海洋大学海洋生命科学学院, 青岛 266100;

③ 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074;

④ 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

* 联系人, E-mail: gcwang@qdio.ac.cn

2011-05-22 收稿, 2011-10-27 接受

国家科技基础性工作专项(SQ2012FY4910019-1)、天津科技支撑计划(10ZCKFSH0070)和天津市科技兴海项目(KX2010-0005)资助

摘要 微藻生物技术近年来得到各国政府和企业的的高度重视。本文分析了微藻生物技术产业的发展态势, 认为虽然微藻生物能源技术有解决世界能源、环境和粮食问题的巨大潜力, 但在近期内不太可能产业化; 不过我国和西方发达国家相比, 发展微藻生物(能源)技术有一定的生产成本优势。在这种认识的基础上, 本文提出了我国发展微藻生物技术产业的研发策略, 即微藻生物能源技术的开发重点应该放在基础研究上, 微藻生物技术的产业化开发重点放在高附加值产品上, 同时兼顾微藻生物技术处理废水。

关键词

微藻
生物能源
生物柴油
虾青素
叶黄素

微藻生物技术是现代生物技术的组成部分之一^[1,2], 其主要研究的对象是单细胞微藻。自 20 世纪 60 年代日本大规模生产小球藻以来, 经过近几十年的发展, 微藻生物技术已经初具规模, 并显示巨大的应用潜力, 为科技工作者、企业和政府所重视^[3-5]。近年来, 国际化石能源价格持续高涨, 温室气体过度排放导致全球气候变化日益显著, 第一代生物能源(燃料乙醇)的开发引发国际粮食价格飙升。在这种背景下, 微藻生物技术研究受到各国政府高度重视, 也成了风险投资的宠儿, 巨额的资金被投入到这一技术领域^[6]。因此, 我们有理由相信微藻生物技术产业在近期内将取得巨大的发展。

微藻生物技术主要面向能源、环境、食品和医药卫生等领域。在能源领域, 微藻有望成为继粮食作物生物乙醇、纤维素生物乙醇和陆生作物生物柴油之后第 3 代生物质能源的原材料^[7-9]。在环境领域, 微藻有大幅减排温室气体二氧化碳的潜力, 并在处理生活和工业污水等方面有广阔的应用前景^[10-12]。在食品领域, 微藻有潜力为人类提供大量单细胞蛋白

质、植物油脂、类胡萝卜素类和 ω -3 长链不饱和脂肪酸等食品或食品添加剂^[13,14]。在医药卫生领域, 从微藻生物资源中寻找新的抗生素、抗癌和抗病毒药物的研究也常见报道^[15]。

尽管微藻生物技术产业潜力巨大, 但是目前微藻生物技术产业的规模总的来说还比较小, 微藻大规模工业化培养仅是近四五十年产业成就。已经实现大规模(自养)培养的微藻物种仅有螺旋藻、小球藻、杜氏盐藻和雨生红球藻等, 主要用于功能食品和饲料添加剂等行业^[16,17]。微藻(自养培养)生物技术产业初级产品的年市场总值估计仅有 10~20 亿元人民币左右。

近年来, 我国微藻生物技术产业发展迅速, 尤其在微藻生物能源研发方面受到政府、科研机构和企业的高度关注^[18-20]。为使我国微藻生物技术产业能够健康发展, 避免或者少走弯路, 我们针对目前的微藻生物技术产业和研发现状, 总结产业发展存在的问题, 并对我国微藻产业的研发策略提出了我们自己的观点。

1 微藻生物技术产业存在的主要问题

微藻生物技术产业规模和潜力之间的差距主要源于对微藻生物技术研发的不足, 诸多技术“瓶颈”尚未解决. 从研发历史来看, 人类利用微藻不足百年, 与工业微生物、农业作物的研发历史相比十分短暂; 从产业研发投入来看, 近几十年来全世界对微藻生物技术的研发投入远远低于对工业微生物和农业作物的研发投入. 因此, 微藻生物技术产业的发展存在很多具有挑战性的基础技术问题, 主要体现在微藻养殖物种筛选和培育所需的生物学基础研究不足以及产业技术工程基础研究薄弱等.

1.1 微藻生物学基础研究不足

微藻生物技术产业最重要的基础工作是获得优质藻种. 要获得优质藻种, 微藻基础生物学研究尤为重要. 首先, 我们需更深入认知自然界的微藻物种多样性, 并从中获得有应用价值的物种. 例如, 我国科学家在废水处理池的污泥中筛选获得的小球藻, 其自养生长速度明显快于目前报道的小球藻藻种, 尤其是该藻种在异养条件下的生长速度可以与细菌媲美^[21]. 据估计, 全球微藻物种约有几十万种甚至更多, 但其中为人类发现并记载的仅有3.5万种^[22,23], 所以自然界中还有很多微藻物种尚未被发现, 这方面的基础研究亟待加强. 其次, 已知的微藻物种的基础生物学研究也非常落后, 微藻种质改良的有效技术手段还十分匮乏^[24]. 尽管国际上已把莱茵衣藻作为光合作用研究的模式物种, 已经完成了全基因组测序, 相关的研究工作已经很深入, 但可以作为微藻生物技术研发的物种几乎没有深入的研究工作^[25,26]. 与高等植物不同, 微藻不同物种间生物学特性差异很大, 例如小球藻, 即便是同一属, 其不同物种间基因组的差异度非常显著. 因此, 针对有潜力作为微藻生物技术开发的物种的基础生物学研究需进一步加强^[27].

1.2 产业工程技术基础薄弱

和工业微生物发酵培养相比较, 微藻工业化培养技术设施尚未成熟. 目前用于微藻大规模培养的主要设施是跑道式培养池^[1,28]. 跑道式培养池有造价低和运行可靠等优点, 但是有单位面积产量低的缺点, 并且由于跑道式培养池不能提供一个封闭的培养环境, 微藻在培养过程中很容易遭到其他生物(如

轮虫等)的污染. 目前尚在研发之中的光生物反应器能够提供封闭的培养环境, 有效防止外来生物的污染, 但是制造和维护成本很高^[29-31]. 因此, 在高附加值健康医药领域, 微藻生物技术产业和工业微生物产业缺乏竞争力. 与农业作物相比, 微藻在采收、干燥和破壁等下游处理过程存在问题. 微藻在培养液中的生物质浓度很低, 并且个体微小, 所以微藻的富集和采收需要复杂的生化工程操作, 增加了微藻生物物质的生产成本^[32]; 微藻产品的干燥过程一般需要采用人工加热的干燥设施, 需要消耗油料和电能; 很多微藻产品的生产, 需要破碎微藻的细胞壁, 这又是昂贵的生物化工过程^[33]. 在微藻生物物质的生产过程中需要提供富集的二氧化碳原料, 也增加微藻的培养成本. 因此, 虽然微藻生物技术产业在开发特殊、高附加值产品方面有一定优势, 但在低附加值食品、饲料和农业领域缺乏竞争力^[34,35].

2 对我国微藻生物技术产业发展的看法

目前世界范围内掀起了一股研发微藻生物质能源的热潮. 2006年以来, 全球新成立了上百家从事微藻生物质能源开发的创业公司^[36]. 这些公司从政府、风险投资、石油公司和航空公司等渠道获得经费支持, 从事微藻生物质能源技术研发^[37,38]. 全球的众多科研机构也纷纷开始从事微藻生物技术方面的研究, 微藻生物技术产业研究出现了空前火热的局面^[6]. 我国也先后启动“863”, “973”^[18]和“十二五”重大专项等开展相关研究. 对于目前微藻生物技术产业出现的火热研究形势, 我们有如下几点看法.

2.1 应该高度重视微藻生物能源技术研究

微藻生物技术确实有潜力解决目前困扰世界发展的能源、环境和粮食问题^[39], 相关的研究值得高度重视. 目前支持世界经济发展的主要能源是化石燃料. 化石燃料的储量有限, 且其消耗速度不断加快^[40], 所以可持续使用和替代化石燃料的生物质能源的开发和利用是人类必须要面对和解决的课题^[41]. 化石燃料的大量使用向大气释放大量的二氧化碳, 导致全球气候变暖^[42], 可能引发不可逆转的灾难性后果^[43]. 开发生物质能源不仅能够提供可持续的燃料来源, 而且不会增加二氧化碳的排放. 然而, 传统的生物质能源生产方式——太阳光能转化率低, 占用大量的土地甚至可耕地资源, 形成了清洁生物能源

消费和人类粮食生产竞争用地的局面,致使世界粮食价格的上升,使发展中国家的人民面临饥饿的威胁^[44]。微藻太阳能光转化效率高,有潜力利用较少的土地面积生产足够数量的生物质能源,满足世界经济社会发展的能源需求^[45],特别是微藻甚至可以利用没有耕种价值的盐碱地、滩涂和沙漠等边际性土地以及海洋进行生物能源的生产。微藻生物能源技术在生产生物能源的同时,还能生产大量的微藻蛋白质作为饲料行业的原料,减少饲料行业对农业的依赖,增加养殖肉类的供应,改善世界食品的供给。因此,微藻生物能源技术有着巨大的潜力和诱人的前景。

微藻生物能源项目对我国有特别重要的意义。我国人口众多,石油资源匮乏,粮食和能源消耗总量大,可持续能源的开发和二氧化碳的减排已经成了我国经济发展亟待解决的问题。同时,我国幅员辽阔,人口众多,具有丰富的微藻生物能源产业发展所需要的边际性土地和人力资源。

2.2 微藻生物能源技术近期内实现产业化的可能性不大

微藻生物能源的开发还需要解决很多具有挑战性的技术问题,可能是一个长期的过程^[34,46,47]。由于微藻生物能源项目的巨大潜力和诱人前景,目前各国政府和企业都对这一项目高度重视。国际上一些公司和科研机构为了获得资助,主观盲目地对微藻生物能源项目做出了过于乐观的预计^[48]。实际上,微藻生物技术产业仍然处在初期发展阶段,微藻生物物质的生产成本仍然很高,大部分微藻生物产品仅限于保健品和饲料添加剂等高附加值产品^[16,17],而生物柴油等微藻生物能源技术产品的单位价值相对很低。在历史上,基于微藻的生物能源也曾经被寄予厚望,虽然经过长期的大量研究,但是并没有取得成功^[35,49]。微藻生物能源技术的成功商业化,需要大幅降低微藻生物物质的生产成本和微藻生物燃料的下游处理成本^[47,50]。

为了实现这个目的,需要克服很多技术难题^[51]。这些技术难题的克服不仅需要在微藻分子生物学、微藻生理学和微藻生物化学领域做很多艰苦的基础研究工作,还需要在微藻大规模培养工程和微藻生物物质下游处理工程领域有很多的技术突破^[52,53]。这些工作是不可能短时间内完成的,所以对微藻生物

能源技术在近期内商业化不宜持有过分乐观的态度^[34,48]。

微藻生物能源产业的潜在产业规模很大,在全球可以高达数千亿美元。即使一个最小型的微藻生物柴油项目可能需要具有200万平方米的生产面积和数亿美元的产值规模才能具有商业化的经济可行性^[54]。目前微藻生物技术全球总的产业规模不超过3亿美元,最大的生产设施占地面积只有几十万平方米。可以预言,期望在短期内实现这种跳跃式的发展很难实现。

对我国来讲,追求微藻生物能源技术在近期内产业化可能更不现实。首先,虽然我国的微藻生物技术产业规模世界最大,生产超过全世界一半以上的微藻生物质,但是同时我国微藻生物技术水平相对落后,行业的工程技术基础还较薄弱,大部分微藻企业的技术还停留在20世纪引进的国外技术水平上。微藻生物能源技术的产业化需要成熟和先进的产业技术基础和熟练的产业工程技术人员,而这些技术和人员在我国目前并不具备。其次,我国的微藻生物技术和微藻生物能源技术的基础研究工作和西方一些发达国家相比也有一定的差距^[20],具备完全自主知识产权的技术成果储备十分有限。目前我国微藻生物技术产业的藻种大都从国外引进。从微藻生物能源的研究来看,美国和日本等主要西方发达国家在这次微藻生物燃料的研发浪潮来临之前就有20多年的研究基础,并且重新引领这次新的研发浪潮,而我国在这方面的深入研究工作则刚刚开始^[20]。总的来说,我国微藻生物技术产业处在初级发展阶段,产业本身的盈利能力非常有限,行业自身几乎没有能力进行微藻产业的大规模投资和研发,产业化研发资金与西方主要发达国家相比也存在差距。

2.3 我国发展微藻生物技术产业也具有一定的战略优势

我们也要看到我国发展微藻生物技术产业的優勢。微藻生物能源产业的关键在于降低微藻生物物质的生产成本,我国在这方面有一定的优势。这一优势不仅是因为我国的劳动力成本低,其他的生产要素,如土地、设备和水电设施的成本也显著低于发达国家,所以同样水平的技术,在发达国家可能因为成本过高行不通,但是在我国却可能实现商业化运营^[55-57]。例如,我国的微藻产业从20世纪80年代的

螺旋藻产业化开始,从无到有,已经做到世界第一,生产全球一半以上的微藻生物质.另外,微藻生物能源技术还可以在产生生物能源的同时减排温室气体二氧化碳.在不久的将来,我国有可能成为世界上排放二氧化碳最多的国家,减排二氧化碳成为我国最重要的国际责任之一.

我国微藻生物产业的技术水平和科研水平低于西方发达国家,近期内期待我国在微藻生物能源领域的研究领先于西方发达国家的想法很难实现.然而,如果我们能看到我国在微藻生物技术产业化上的优势,在积极开展微藻生物技术基础研究和产业化开发的同时,跟踪学习西方先进技术,及时引进国外在相关技术领域某些技术环节的先进成果,根据我国国情整合国内外的产业技术资源,发展出适合我国国情的微藻生物能源技术方案,那么我国在世界范围内率先实现微藻生物能源技术产业化也不无可能.

3 我国微藻生物技术产业的研发策略

基于我国国情并考量微藻生物技术产业的发展趋势,我们认为,我国微藻生物技术应该采取微藻生物技术基础研究和产业化研发并重的策略^[18,20],即微藻生物能源技术的研发应该重点放在基础研究上,微藻生物技术产业化的研发应该重点放在高附加值产品生产上,兼顾传统微藻生物技术工艺升级改造以及处理工业和生活废水等方面.

3.1 微藻生物能源技术研发的重点应放在基础研究上

既然微藻生物能源技术在近期内实现产业化的目标相对困难,近期的目标就应该侧重于微藻生物技术基础研究方面,并取得突破,为未来的产业化开发奠定基础.微藻生物技术领域的基础研究包括微藻生物学基础研究和微藻工程技术基础研究两方面的内容.能否在微藻生物技术基础研究领域获得突破性成果,应该是衡量我国微藻生物能源研究项目在近期内是否成功的首要标准.

(i) 微藻生物学基础研究内容. 微藻生物学基础研究包括微藻的采集和分类学、微藻基因组学、微藻蛋白质组学、微藻代谢组学、微藻生理学、微藻生物化学和微藻基因工程等研究.从庞大的微藻生物资源宝库中筛查到有经济价值的藻种并加以基因工程改造应该是微藻生物能源项目的首要任务和重要

成果^[58].理想的微藻品种应该具有光能利用率高、生长快、含油率高、含有高附加值副产品、易于收集浓缩和易于油脂提取等特点^[47].虽然目前研发的微藻物种中具有一个或几个上述的特点,但是具有全部特点的微藻物种还未见报道.微藻生物能源产品的低价值特点决定了目标物种应该具有以上全部的特点才有可能实现微藻能源产品的产业化.

借鉴对高等植物和工业微生物基础研究的方法和思路,在微藻分类学、微藻基因组学、微藻蛋白质组学、微藻代谢组学、微藻生理学、微藻生物化学和微藻基因工程领域开展深入研究,完成几种重要微藻的全基因组测序,获得一些具有重要功能的基因和蛋白质,阐明微藻调控油脂或其他代谢产物生物合成的分子机制都将是微藻生物能源技术生物学基础研究的重大突破^[35].

在以上微藻基础生物学研究工作基础上建立有效的微藻种质改良的技术平台,也是微藻生物技术基础研究领域的重大发展方向^[35].创新微藻新藻种培育方法,突破传统农业育种理论体系可能对微藻生物技术的发展有重要意义.近几年发展起来的合成生物学方法和理论有望在微藻生物技术育种和微藻生物能源领域有重要的应用,这方面的工作值得高度重视^[59].

(ii) 微藻生物技术工程基础研究内容. 微藻生物技术工程基础研究包括微藻工业规模培养平台技术、微藻工业规模采收和产物提取平台技术等.研发低造价、可标准化建造、工业化规模生产的微藻培养设备,发展低成本的微藻培养工艺应该是微藻生物能源技术工程基础研究重要任务之一^[53].解决这一长期桎梏微藻生物技术产业发展的问题,将使微藻产业技术工程基础研究取得重大进展.其次,发展低成本和标准化的微藻采收和产物提取工艺和设备也是微藻生物能源技术的重要研发内容,这方面也期望取得突破性进展.

利用工业废气二氧化碳生产微藻产品,既可以降低微藻生物质生产的原材料成本,又实现了二氧化碳的减排,具有经济和社会双重效益^[60].为了实现这一美好的愿景,也需要开展微藻工程基础研究工作.尤其对于微藻生物能源产业来说,由于其产品的低附加值性质,利用免费甚至补贴的工业废气二氧化碳作为生产原料几乎是必需的.虽然说气体的传输在化学工程领域已经有成熟的理论和设备,废

气二氧化碳向微藻培养液的输送和传递在工程上应该不难解决^[61,62]，但是在产业中大规模利用废气二氧化碳仍然需要做一些基础的工程技术研发工作。

微藻培养过程中的敌害生物防御技术也是微藻生物工程研究应该注意的问题。主要有3种技术措施可以抵制微藻培养过程中外来原生动物的捕食，即物理隔离、养殖过程调控和化学试剂选择性添加等。物理隔离即尽量利用封闭的光生物反应器培养微藻，避免外来生物的入侵。这一方法依赖于光生物反应器的技术进步。养殖过程调控可以通过提高接种浓度、缩短开放培养时间或采用具有选择性的培养基等措施降低外来生物污染藻液的可能性。这种方法要求藻种有某些抗逆性。采用化学试剂包括农药等可能是防治某些病虫害的有效手段，但是这种方法有对环境产生不利影响和增加微藻培养成本等问题，长期使用也可能会导致原生动物的产生抗药性。

3.2 微藻生物技术产业化开发重点应该放在高附加值产品上

分析目前微藻生物技术研发进展，近期内有可能商业化生产的微藻高附加值产品主要包括类胡萝卜素产品和食用生物油脂类产品两大类。这些产品因为附加值比较高，与微藻生物质能源产品相比能够承受更高的微藻生物质生产成本。

(i) 微藻类胡萝卜素产品的开发。微藻生物技术生产天然虾青素长期受到关注，在国内外已经实现了小规模的产业化，但仍然有很大的发展空间。虾青素是一种红色的类胡萝卜素，被广泛用于水产养殖饲料和保健食品，市场总规模在3亿美元以上^[16,17]。然而，因为生产成本的原因，目前主要靠化工合成的方法生产^[63]。化工合成产品因为和天然产品结构不同，生物学效应和安全性一直受到质疑，仅被允许用作水产饲料添加剂，其应用范围有限^[64]。利用微藻生物技术生产的天然虾青素，具有增强免疫、消除炎症、预防心脑血管疾病等生物学功能，可用作保健食品。但是由于目前微藻生物技术虾青素生产成本远高于化工合成的虾青素，所以无法和化工合成的虾青素在水产饲料添加剂市场中竞争^[65,66]。随着微藻生物技术生产虾青素工艺水平的不断提高，微藻虾青素的生产成本逐渐下降。最新文献报道，微藻生物技术生产的天然虾青素生产成本可能低于化工合成虾青素的生产成本，这可能为微藻生物技术产业打

开了一个大约3亿美元的虾青素水产养殖市场^[57]。

中试规模的研究报告表明，微藻生物技术生产叶黄素具有产业化的可行性^[66-68]。叶黄素是一种橘黄色的类胡萝卜素，具有预防老年性黄斑变性、白内障、癌症和心脑血管疾病等生物学功能，从营养学角度来看几乎等同于维生素，在保健食品和食品着色剂领域有广泛的应用^[69,70]。仅在美国，每年的市场总额就有1.5亿美元。在欧洲，植物来源的叶黄素也被批准为食品添加剂使用。目前叶黄素的生产方法是从万寿菊花瓣中提取，这种生产方法有很多缺点：(1) 万寿菊花瓣的叶黄素含量很低，最低只有0.03%，并且不稳定^[71]；(2) 万寿菊单位面积产量低，叶黄素的生产需要大面积占用可耕地；(3) 万寿菊采摘需要在很短的时间内完成，需要大量的劳动力。由此导致从万寿菊花瓣生产叶黄素的成本很高，并且只能在土地和人力资源丰富的发展中国家进行。中试规模的研究表明，如果利用微藻生产叶黄素，即使是在目前的微藻生物技术水平，与种植万寿菊的方法相比在成本上也有竞争力。随着发展中国家土地和劳动力价格水平的提高和微藻生产叶黄素技术的进步，微藻取代万寿菊生产叶黄素可能成为发展趋势，形成几亿美元的产业。

(ii) 微藻生物油脂类产品的开发。微藻自养培养生产 ω -3 不饱和脂肪酸有望形成巨大的产业。 ω -3 不饱和脂肪酸主要指DHA、EPA和亚麻酸等，是人体重要营养成分，有抗凝血、防心血管病、降血脂、防动脉硬化和抗癌等重要生理功能，摄入不足会影响婴幼儿的智力发育、成年人的记忆力思维力以及诱发老年痴呆症^[72]。此外， ω -3 不饱和脂肪酸还广泛用于海水鱼类的育苗和养殖。 ω -3 不饱和脂肪酸市场规模很大，仅DHA在美国的市场就有100亿美元。传统上 ω -3 不饱和脂肪酸是从深海鱼油中提取，但从鱼油中提取有得率低、易氧化、有鱼腥味和含有污染物质等问题。随着海洋渔业资源的减少， ω -3 不饱和脂肪酸产品生产成本逐渐升高^[73]。利用微藻生产 ω -3 不饱和脂肪酸可以保证产品的质量 and 产量稳定，满足不断增长的市场需要，是理想的鱼油的替代品，具有深远的意义^[74]。异养培养微藻生产DHA产品在商业上已经取得了成功，能够和传统的鱼油方法在价格上竞争，形成了相当规模的产业。自养培养微藻生产EPA等不饱和脂肪酸也有潜力在近期内产业化^[75,76]。

微藻食用油脂产品的商业化也极有可能领先于

微藻生物柴油产品. 一方面, 微藻生物油脂产品如果能用于食品行业, 其价格要高于生物柴油. 世界的政治、经济和农业发展水平决定了食用油脂的价格要远高于生物柴油, 否则大量的食用油脂就会被转化成生物柴油作为能源消费, 将会造成食用油脂严重短缺. 另一方面, 微藻生物柴油产品从生产工艺上来讲需要利用微藻生物油脂作为原材料, 经过化工或生物化学过程转化而成, 其生产成本肯定要高于微藻生物油脂. 那么根据经济学的常识就可以判断, 微藻生物食用油脂产品的商业化肯定就要早于微藻生物柴油产品.

3.3 微藻生物技术产业化开发同时兼顾传统生产工艺改进和微藻处理废水

传统微藻生物技术产品如螺旋藻粉、小球藻粉和杜氏盐藻粉的生产成本和农业粮食作物产品相比相对较高. 螺旋藻粉目前的生产成本在 25000 元/吨以上, 小球藻粉的生产成本在 40000 元/吨以上, 而杜氏盐藻粉的生产成本在 80000 元/吨以上. 微藻产品成本主要来源于固定资产折旧、微藻干燥燃油费用、二氧化碳等原材料费用、微藻采收电力费用、微藻培养过程电力费用和人力工资等. 如果利用火电厂烟道气二氧化碳来培养微藻, 能省去二氧化碳的原料费用, 将可能降低微藻生产成本 3000~8000 元/吨; 如果利用热电厂的余热干燥微藻, 每吨能节约燃油费用 5000~10000 元. 因此, 采用以上两项技术, 螺旋藻粉的生产成本可能降低到 10000 元/吨以下. 小球藻和杜氏盐藻的收集目前在产业上利用碟片离心机离心的方法实现, 这种方法固定资产投资多, 电力消耗成本高, 但如果采用絮凝等新技术收集微藻, 可能大幅降低小球藻和杜氏盐藻产品的生产成本.

利用微藻处理生活、工业和农业废水, 因为具有双重的经济社会效益, 近些年受到科研和产业界的重视^[77,78]. 和传统的污水处理方法相比, 微藻不仅能去除污水中的有机物, 还能去除含氮和磷等的无机营

养盐, 尤其还能富集吸附重金属离子^[79,80]. 微藻在废水处理过程中生成的生物质可能用于生物能源、肥料和饲料等^[81,82]. 微藻处理废水技术研发的历史比较长, 在产业上也早有应用^[83,84]. 近些年, 我国的一些湖沼和海洋氮磷富营养化已经造成了灾难性的后果, 一些地方的重金属污染严重危害人民健康, 这种形势要求我们要加强微藻废水处理技术的研发.

4 结论

微藻生物技术目前的产业规模很小, 但产业的潜力很大. 这种产业规模和潜力的差距主要来源于微藻生物学基础和产业技术工程基础的研发不足.

对目前微藻生物技术的火热研究形势, 我们有 3 点基本看法和判断: 第一, 微藻生物技术有潜力解决困扰世界经济社会发展的能源、环境和粮食问题, 值得高度重视; 第二, 微藻生物能源技术的开发需要解决很多具有挑战性的技术瓶颈问题, 近期内产业化的可能性不大; 第三, 我国拥有微藻生物技术产业发展所特殊需要的土地和人力资源以及生产成本优势, 有望引领世界微藻生物技术的发展.

基于微藻生物技术产业的发展趋势和我国国情, 我们提出了基础研究和产业化开发并重的研发策略, 如图 1 所示. 内容包括: (1) 微藻生物能源技术的开发重点应放在基础研究上; (2) 微藻生物技术的产业化开发重点应放在高附加值产品上; (3) 产业化开发同时兼顾传统微藻生产工艺改进和微藻废水处理.

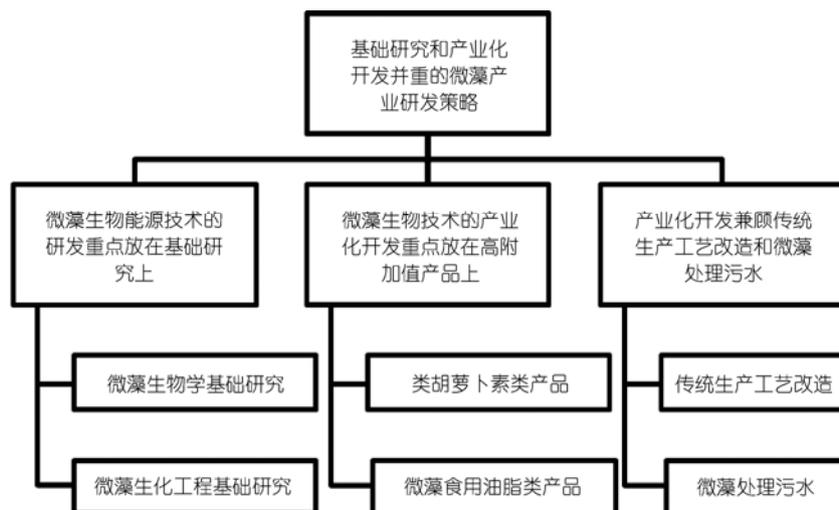


图 1 我国微藻生物技术产业化研发策略

我们相信采用基础研究和产业化开发并重的研发策略,能大力推动我国微藻生物技术产业的快速发展。我们也认为采用基础研究和产业化并重

的研发策略,保持微藻生物能源技术研究水平和西方发达国家同步发展,我国微藻生物能源技术在世界范围内率先实现产业化是有可能的。

参考文献

- 1 Borowitzka M A. Commercial production of microalgae: Ponds, tanks, tubes and fermenters. *J Biotechnol*, 1999, 70: 313–321
- 2 Becker E W. *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994
- 3 陈峰, 姜悦. 微藻生物技术. 北京: 中国轻工业出版社, 1999
- 4 张学成, 杨官品. 微藻基因工程及微藻产品高值化. *海洋科学*, 2000, 11: 24–26
- 5 Richmond A. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Oxford: Wiley-Blackwell, 2004
- 6 Haag A. Algae bloom again. *Nature*, 2007, 447: 520
- 7 Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv*, 2007, 25: 294–306
- 8 Chisti Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol*, 2008, 26: 126–131
- 9 韩笑天, 郑立, 孙珊, 等. 海洋微藻生产生物柴油的应用前景. *海洋科学*, 2008, 32: 76–81
- 10 Benemann J R. CO₂ mitigation with microalgae systems. *Energy Convers Manag*, 1997, 38: S475–S479
- 11 Mallick N. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: A review. *Biometals*, 2002, 15: 377–390
- 12 Hammouda O, Gaber A, Abdelraouf N. Microalgae and wastewater treatment. *Ecotoxicol Environ Safety*, 1995, 31: 205–210
- 13 Becker E. Nutritional properties of microalgae: Potentials and constraints. In: Richmond A, ed. *Handbook of Microalgal Mass Culture*. Boca Paton: CRC Press, 1984. 339–408
- 14 Behrens P W, Kyle D J. Microalgae as a source of fatty acids. *J Food Lipids*, 1996, 3: 259–272
- 15 Plaza M, Santoyo S, Jaime L, et al. Screening for bioactive compounds from algae. *J Pharmaceut Biomed Anal*, 2010, 51: 450–455
- 16 Del Campo J, García-González M, Guerrero M. Outdoor cultivation of microalgae for carotenoid production: Current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2007, 74: 1163–1174
- 17 Milledge J. Commercial application of microalgae other than as biofuels: A brief review. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 2010, 10: 1–11
- 18 黄英明, 王伟良, 李元广, 等. 微藻能源技术开发和产业化发展思路与策略. *生物工程学报*, 2010, 26: 907–913
- 19 Huang G H, Chen F, Wei D, et al. Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Appl Energy*, 2010, 87: 38–46
- 20 Li Y G, Xu L, Huang Y M, et al. Microalgalbiodiesel in China: Opportunities and challenges. *Appl Energy*, 2011, 88: 3432–3437
- 21 Qiao H J, Wang G C, Zhang X J. Isolation and characterization of *Chlorella sorokiniana* Gxnn01 (Chlorophyta) with the properties of heterotrophic and microaerobic growth. *J Phycol*, 2009, 45: 1153–1162
- 22 Norton T, Melkonian M, Andersen R. Algal biodiversity. *Phycologia*, 1996, 35: 308–326
- 23 Metting F B. Biodiversity and application of microalgae. *J Indust Microbiol Biotechnol*, 1996, 17: 477–489
- 24 Radakovits R, Jinkerson R E, Darzins A, et al. Genetic engineering of algae for enhanced biofuel production. *Eukaryot Cell*, 2010, 9: 486–501
- 25 Parker M S, Mock T, Armbrust E V. Genomic insights into marine microalgae. *Annu Rev Genet*, 2008, 42: 619–645
- 26 Grossman A R. Paths toward algal genomics. *Plant Physiol*, 2005, 137: 410
- 27 Ball S G. Eukaryotic Microalgae genomics. The essence of being a plant. *Plant Physiol*, 2005, 137: 397–398
- 28 Pulz O. Photobioreactors: Production systems for phototrophic microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2001, 57: 287–293
- 29 Eriksen N. The technology of microalgal culturing. *Biotechnol Lett*, 2008, 30: 1525–1536
- 30 Ugwu C, Aoyagi H, Uchiyama H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresour Technol*, 2008, 99: 4021–4028
- 31 Benemann J R. Open ponds and closed photobioreactors comparative economics. In: 5th Annual World Congress on Industrial Biotechnology & Bioprocessing. Chicago, 2008
- 32 Salim S, Bosma R, Vermu M H, et al. Harvesting of microalgae by bio-flocculation. *J Appl Phycol*, 2011, 23: 1–7
- 33 Grima E M, Fernández F G A, Medina A R. Downstream processing of cell-mass and products. In: Richmond A, ed. *Handbook of Microalgal Culture*. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 215–252
- 34 Williams P J B, Laurens L M L. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics. *Energy Environ Sci*, 2010, 3: 554–590

- 35 Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, et al. A look back at the us department of energy's aquatic species program: Biodiesel from algae. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory NREL TP-580-24190, 1998
- 36 Edwards M. The Algal Industry Survey. Tempe: Arizona State University & Center for Management Technology, 2009
- 37 Gross M. Algal biofuel hopes. *Curr Biol*, 2008, 18: R46–R47
- 38 Service R F. Exxonmobil fuels venter's efforts to run vehicles on algae-based oil. *Science*, 2009, 325: 379
- 39 Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, et al. Commercial applications of microalgae. *J Biosci Bioeng*, 2006, 101: 87–96
- 40 Birol F. World Energy Outlook. Paris: International Energy Agency, 2008
- 41 刘全根. 国家能源结构调整的战略选择: 加强可再生能源开发利用. *地球科学进展*, 2000, 15: 154–164
- 42 Solomon S. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 43 Solomon S, Plattner G, Knutti R, et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 1704–1709
- 44 Boddiger D. Boosting biofuel crops could threaten food security. *Lancet*, 2007, 370: 923–924
- 45 Williams P. Biofuel: Microalgae cut the social and ecological costs. *Nature*, 2007, 450: 478
- 46 李元广, 谭天伟, 黄英明. 微藻生物柴油产业化技术中的若干科学问题及其分析. *中国基础科学*, 2009, 11: 64–70
- 47 Wijffels R, Barbosa M. An outlook on microalgal biofuels. *Science*, 2010, 329: 796–799
- 48 Waltz E. Biotech's green gold? *Nat Biotechnol*, 2009, 27: 15–18
- 49 Benemann J R, Weissman J C, Koopman B L, et al. Energy production by microbial photosynthesis. *Nature*, 1977, 268: 19–23
- 50 Greenwell H, Laurens L, Shields R, et al. Placing microalgae on the biofuels priority list: A review of the technological challenges. *J Royal Soc Interface*, 2010, 7: 703
- 51 Singh J, Gu S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renew Sust Energy Rev*, 2010, 14: 2596–2610
- 52 Vasudevan P T, Briggs M. Biodiesel production current state of the art and challenges. *J Indust Microbiol Biotechnol*, 2008, 35: 421–430
- 53 Pienkos P T, Darzins A. The promise and challenges of microalgal derived biofuels. *Biofuels Bioprod Biorefin*, 2009, 3: 431–440
- 54 Stephens E, Ross I, King Z, et al. An economic and technical evaluation of microalgal biofuels. *Nat Biotechnol*, 2010, 28: 126–128
- 55 Olaizola M. Commercial development of microalgal biotechnology: From the test tube to the marketplace. *Biomol Engin*, 2003, 20: 459–466
- 56 Guerin M, Huntley M, Olaizola M. *Haematococcus astaxanthin*: Applications for human health and nutrition. *Trends Biotechnol*, 2003, 21: 210–216
- 57 Li J, Zhu D, Niu J, et al. An economic assessment of astaxanthin production by large scale cultivation of *Haematococcus pluvialis*. *Biotechnol Adv*, 2011, 29: 568–574
- 58 Scott S A, Davey M P, Dennis J S, et al. Biodiesel from algae: Challenges and prospects. *Curr Opin Biotechnol*, 2010, 21: 277–286
- 59 Lü J, Sheahan C, Fu P. Metabolic engineering of algae for fourth generation biofuels production. *Energy Environ Sci*, 2011, 4: 2451–2466
- 60 李健, 王广策. 微藻生物技术在二氧化碳减排和生物柴油生产中的应用研究进展. *海洋科学*, 2011, 35: 122–129
- 61 Negoro M, Hamasaki A, Ikuta Y, et al. Carbon dioxide fixation by microalgae photosynthesis using actual flue gas discharged from a boiler. *Appl Biochem Biotechnol*, 1993, 39: 643–653
- 62 Pedroni P, Davison J, Beckert H, et al. A proposal to establish an international network on biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae. *J Energy Environ Res*, 2001, 1: 136–150
- 63 Higuera-Ciapara I, Felix-Valenzuela L, Goycoolea F. Astaxanthin: A review of its chemistry and applications. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2006, 46: 185–196
- 64 Newsome R. Food colors. *Food Technol*, 1986, 40: 49–56
- 65 Lorenz R, Cysewski G. Commercial potential for *haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin. *Trends Biotechnol*, 2000, 18: 160–167
- 66 Fernández Sevilla J M, Ación Fernández F, Molina Grima E. Biotechnological production of lutein and its applications. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010, 86: 27–40
- 67 Blanco A M, Moreno J, Del Campo J A, et al. Outdoor cultivation of lutein-rich cells of *Muriellopsis* sp. in open ponds. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2007, 73: 1259–1266
- 68 Ceron M C, Campos I, Sanchez J F, et al. Recovery of lutein from microalgae biomass: Development of a process for *scenedesmus almeriensis* biomass. *J Agric Food Chem*, 2008, 56: 11761–11766
- 69 Ma L, Lin X M. Effects of lutein and zeaxanthin on aspects of eye health. *J Sci Food Agric*, 2010, 90: 2–12
- 70 Kalariya N M, Ramana K V, vanKuijk F J G M. Focus on molecules: Lutein. *Exp Eye Res*, 2011

- 71 Piccaglia R, Marotti M, Grandi S. Lutein and lutein ester content in different types of tagetes patula and *T. Erecta*. *Indust Crops Prod*, 1998, 8: 45–51
- 72 温雪馨, 李建平, 侯文伟, 等. 微藻 Dha 的营养保健功能及在食品工业中的应用. *食品科学*, 2010, 31: 446–450
- 73 Luiten E E M, Akkerman I, Koulman A, et al. Realizing the promises of marine biotechnology. *Biomol Eng*, 2003, 20: 429–439
- 74 Molina Grima E, Belarbi E H, Ación Fernández F G, et al. Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. *Biotechnol Adv*, 2003, 20: 491–515
- 75 Harun R, Singh M, Forde G M, et al. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renew Sust Energy Rev*, 2010, 14: 1037–1047
- 76 Ward O P, Singh A. Omega-3/6 fatty acids: Alternative sources of production. *Proc Biochem*, 2005, 40: 3627–3652
- 77 Munoz R, Guieysse B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Res*, 2006, 40: 2799–2815
- 78 Pizarro C, Mulbry W, Blersch D, et al. An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent. *Ecol Engin*, 2006, 26: 321–327
- 79 Lesmana S O, Febriana N, Soetaredjo F E, et al. Studies on potential applications of biomass for the separation of heavy metals from water and wastewater. *Biochem Engin J*, 2009, 44: 19–41
- 80 Wang J, Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnol Adv*, 2009, 27: 195–226
- 81 Yan D, Lu Y, Chen Y F, et al. Waste molasses alone displaces glucose-based medium for microalgal fermentation towards cost-saving biodiesel production. *Bioresour Technol*, 2011, 102: 6487–6493
- 82 Park J B K, Craggs R J, Shilton A N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresour Technol*, 2011, 102: 35–42
- 83 Oswald W J, Gotaas H B. Photosynthesis in sewage treatment. *Trans Am Soc Civ Eng*, 1957, 122: 73–105
- 84 Craggs R J, Adey W H, Jenson K R, et al. Phosphorus removal from wastewater using an algal turf scrubber. *Water Sci Technol*, 1996, 33: 191–198

Prospects and research strategies for the microalgal industry

LI Jian¹, ZHANG XueCheng², HU HongJun³ & WANG GuangCe⁴

¹ College of Bioengineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

² College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

³ Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China;

⁴ Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Microalgal technology has recently received significant international attention from government and industry. In this review, the developing trends of the microalgal industry were analyzed, indicating that the commercialization of microalgal biofuels might not be realized in the near future, although the technology has great potential to resolve international challenges in energy, environment and food production. A research strategy for the microalgal industry in China is outlined. Research on microalgal biofuel projects should focus on the basics of microalgal biology and engineering, and the development of commercial microalgal projects should be restricted to high value added products. A concurrent effort should examine wastewater treatment.

microalgae, bioenergy, biodiesel, astaxanthin, lutein

doi: 10.1360/972011-1024