



专题论述

温室气体减排与微藻生物能源的集成

毕建国^①, 刘晓欣^①, 朱俊英^②, 荣峻峰^②, 宗保宁^{②*}, 高宏^③, 耿亚洪^④, 向文洲^⑤^① 中国石化石家庄炼化分公司, 石家庄 050099^② 中国石化石油化工科学研究院, 北京 100083^③ 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072^④ 中国科学院武汉植物园, 武汉 430074^⑤ 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

*通讯作者, E-mail: zongbn.ripp@sinopec.com

收稿日期: 2013-07-24; 接受日期: 2013-09-10; 网络版发表日期: 2013-12-03

doi: 10.1360/032013-242

摘要 微藻生物能源具有巨大的开发潜力及应用前景, 但仍面临很多产业化瓶颈. 本文分析了微藻生物能源技术的潜力与存在的问题, 指出制约微藻生物能源技术发展的主要障碍为规模养殖, 如何提高微藻生长效率、降低能耗、提高规模生产的可靠性仍是面临的艰巨任务. 本文介绍了石油化工企业温室气体减排与微藻生物能源技术的集成及技术思路, 构建了减排工业废气与生产微藻生物能源的循环经济模式. 此外, 还介绍了中国石化在利用温室气体发展微藻生物能源技术方面的实践, 围绕能源微藻选育技术、光生物反应器技术、微藻生物质加工及综合利用技术展开阐述.

关键词微藻
生物能源
温室气体减排
工业化集成

1 引言

“能源”与“环境”是新世纪人类社会在可持续发展中所面临的重要问题^[1, 2]. 一方面, 支撑人类现代文明的化石能源不可再生, 世界各国均在加紧开发替代能源技术; 另一方面, 人类在加工和使用化石能源时不可避免地排放废气与污水, 污染了人类的生存环境. 石油化学工业作为国民经济的支柱产业, 既是能源生产大户, 也是能源消耗大户, 因此, 石化产业在我国低碳经济发展过程中具有举足轻重的作用. 中国石化将“绿色低碳”纳入公司发展战略, 在优化能源结构、提高能效的同时, 大力开展生物质能源等可再生能源技术的研究开发.

微藻是由阳光驱动的“活的化工厂”, 其效率极高, 可以在常温常压下实现对 CO_2 等温室气体的高效吸收. 通过微藻细胞高效的光合作用, 将光能转化为化学能, 储存在脂肪或淀粉等有机物中, 并放出

O_2 . 利用微藻生产生物能源与化学品可以同时达到“替代化石能源和减少温室气体排放”的双重目的^[3, 4]. 本文通过深入分析微藻生物能源技术的潜力与存在的问题, 介绍了中国石化在构建减排工业废气与生产微藻生物能源相结合的循环经济模式中的实践, 以期对解决“能源、环境、资源协调可持续发展问题”起到促进和引导作用.

2 微藻生物能源技术的潜力与存在的问题

微藻是一类在水中生长的低等生物, 其种类繁多、分布广泛, 全世界约有 2 万种微藻生长在从游泳池到盐湖等不同种类的水体中, 随着研究的开展, 越来越多的微藻被采集发现^[5]. 微藻通过光合作用产生了地球上约 1/3 的生物量. 每固定 1 mol CO_2 , 则有 477 kJ 的能量存储到生物质中^[3]. 微藻的光合效率可以达到 7%^[6], 而一般植物和森林仅能利用入射光能

的 0.2%^[7]. 微藻是自然界中生长最迅速的物种之一, 在适宜的条件下, 有些微藻一天内所含生物质量可以翻倍^[8], 而且, 有些微藻的油脂含量可以达到 20%~50%^[9]. 此外, 微藻还可利用废水或咸水以及在不适宜传统农作物耕种的地区培养.

欧美发达国家早已认识到微藻的巨大潜力和独特性质^[10], 政府和企业投入大量资金开展微藻生物能源技术的研究开发. 1978 年美国启动了利用微藻生产生物柴油的“水生生物种计划”^[11], 经过十多年的努力, 开展了从微藻生物资源普查, 到藻种选育, 再到微藻规模培养等一系列卓有成效的探索工作. “水生生物种计划”采用开放池进行室外培养, 在加州和夏威夷分别建立了试验基地, 进行了长达 6 年的培养研究; 之后又相继在新墨西哥州和以色列资助了两项开放池培养计划. 在夏威夷试验基地使用小型的开放池, 培养池的面积从几平方米到几十平方米不等. 在加州试验基地, 建成了 4 个 200 m² 和 3 个 100 m² 培养池. 小培养池获得的单日最高产量分别为 40 g/(m² d) (0.35 m² 培养池) 和 50 g/(m² d) (3 m² 培养池). 100 m² 培养池, 产量达到 23.6 g/(m² d); 1000 m² 培养池的产量为 10~11 g/(m² d). “水生生物种计划”的研究结果表明^[11], 温度对生物质产量具有显著影响. 但是, 在小型培养池中可以获得较高的单位面积产量, 培养规模扩大后, 单位面积产量却随之下降. 该项计划在 CO₂ 高效利用技术方面进行了有益的探索, 开展了微藻减排火电厂 CO₂ 的工业示范.

1990~2000 年, 日本政府资助了一项名为“地球研究更新技术计划”的项目, 此项计划利用微藻进行生物固定 CO₂, 并着力开发密闭光合生物反应器技术, 通过微藻吸收火力发电厂烟气中的 CO₂ 以生产高附加值的生物质能源^[12]. 该项计划共有 20 多家公司和政府的研究机构参与, 分离出 10000 多株微藻, 并筛选出多株耐受高 CO₂ 浓度、耐高温、生长速度快、能形成高细胞密度的藻种. 与微藻生物能源技术开发同步, 国外一些航空公司采用藻油加工的航空燃料进行了飞行试验^[13].

近年来, 石油价格飙升, 掀起了微藻生物能源技术研究的热潮. 除欧美等发达国家投入巨资开展研发外, 国内的中国石化、中海油、新奥等企业以及中科院、华东理工大学等科研机构 and 高校也纷纷立项开展微藻生物能源技术的研究开发. 初步实践表明, 微藻生物燃料的成本为化石能源的数倍, 而且大规模

培养产油微藻的养殖成本高于油料作物的栽培; 其技术链上的多个环节也缺乏系统的解决方案, 如藻细胞高效采收与脱水技术、藻油低成本提取技术、微藻生物质综合利用技术等. 总结归纳国内外已有技术可知, 目前, 微藻生物能源技术尚不能与化石能源竞争, 迫切需要相关的技术创新以及工业化集成.

3 减排温室气体与微藻生物能源的集成

21 世纪以来, 温室气体引发的气候问题凸现^[14, 15], 我国的温室气体排放量快速增加^[16]. 另一方面, 我国石油资源对外依存度超过 60%. 将减排温室气体与生产微藻生物能源集成(图 1), 是解决上述矛盾的理想方案. 石油化学工业排放大量的烟气和废水, 其中富含 CO₂ 和 NO_x. 而微藻的生长必须提供足够的水、CO₂ (碳肥) 和氮肥, 三者是“微藻细胞工厂”的主要原料, 也是微藻养殖的主要原料成本. 因此, 减排温室气体与微藻生物能源集成, 一举两得.

目前, 螺旋藻的工业养殖中, 碳源(碳酸氢钠)成本为 1 万元/吨^[13]. 如果采用工业废气中的 CO₂ 代替碳酸氢钠养殖微藻, 不仅使碳源“零”成本, 而且可以带来减排的收益. 根据《京都议定书》规定的目标^[17], 自 2005 年开始, 欧盟、日本等发达国家与地区已开始对 CO₂ 的排放进行定量控制; 对于中国等发展中国家, 于 2012 年开始对 CO₂ 排放进行定量控制. 我国每减排 1 t CO₂ 的指标售价为 100 元(CDM 机制).

废气中的 NO_x 也可以作为氮源被微藻吸收利用^[18]. 微藻可以在较宽的氮氧化物浓度范围内吸收氮氧化物. 美国绿能公司的专利表明, 利用微藻吸收烟气中的 NO_x, 脱除率高达 98%^[19]. 工业废气中的 NO₂ 易溶

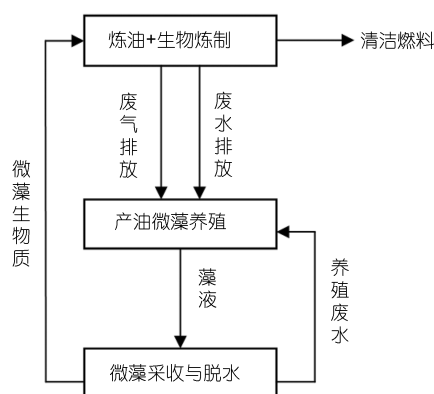
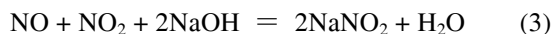
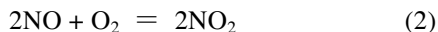


图 1 减排温室气体与微藻生物能源集成的技术路线图

于碱性水形成硝酸盐与亚硝酸盐(式(1)). NO 通过氧化可转化为 NO₂, 从而进一步溶于水被微藻吸收利用(式(2, 3)).



以中国石化石家庄炼化分公司为例, 该公司原油处理量为 800 万 t, 主要产品包括: 204 万 t 汽油、325 万 t 柴油、16 万 t 己内酰胺等; 同时排放 CO₂ 200 万 t、NO_x 2000 t. 若采用微藻生物技术对其进行治理, 兼顾减排温室气体、降低成本和生产微藻生物能源, 可谓“一石三鸟”.

在较低水平下, 以成熟的开放池为养殖方式, 微藻生物质产率可达 15 g/(m² d). 微藻中含氮的主要物质是蛋白质和核酸, 氮元素的含量一般为细胞干重的 10%左右^[20-23], 则微藻可固定的 N 质量为 15 × 10% = 1.5 g/(m² d). 完全固定石家庄炼化分公司排放的 NO_x 约需要 180 公顷土地(NO_x 中 N 含量按 40% 计算, 每年操作 300 d), 每年生产微藻 8100 t, 按含油量 20% 计算, 可得到油脂 1600 t, 并产生大量蛋白质、多糖等副产品. 若每生产 1 g 微藻生物质, 固定 1.83 g CO₂^[20], 则每年减排 1.5 万 t CO₂.

在中等水平下, 以中国石化开发的新型封闭式光生物反应器为培养装置, 微藻生物质产率可达 20 g/(m² d) 以上, 则完全固定石家庄炼化分公司排放的 NO_x 大约需要 135 公顷土地(按每年操作 300 d 计算). 在文献报道的较高水平下^[6], 以薄层光生物反应器为培养装置, 微藻生产力可达 38 g/(m² d), 则完全固定石家庄炼化分公司排放的 NO_x 大约需要 70 公顷土地(按每年操作 300 d 计算). 通过上述分析(表 1), 减排温室气体与生产微藻生物能源集成可以降低微藻的生产成本, 并为生物炼制提供微藻生物质. 但是, 此目标的实现需要成熟、可靠的微藻生物能源成套技术.

4 减排温室气体与微藻生物能源集成涉及的关键技术

4.1 能源微藻选育技术

优质的藻种是微藻生物能源技术的起点, 藻种的性能决定了后续多个技术环节的可行性. 适于大规模养殖的产油藻种必须符合以下 4 个条件: (1) 烟

表 1 微藻固定中国石化石家庄炼化分公司排放的 NO_x 所需占地面积

微藻生产率(g/(m ² d))	所需占地面积(公顷)
15	180
20	135
38	70

气耐受性强; (2) 生长速度快; (3) 抗逆性强; (4) 油脂含量高. 此外, 藻种最好还具有易于沉降采收、不宜黏附团聚等特点. 藻种的选育主要包括 3 方面: (1) 对自然界中的微藻生物资源进行筛查, 进行系统的收集、表征、筛选、整理和保存; (2) 对筛选微藻的生理生化特性进行深入研究, 如温度、pH、盐碱度、光照等主要环境条件, 以及 N、Si、P、S 和微量元素等营养因素对微藻生长和生物质组成的影响规律与作用机理^[24-26], 对于 NO_x 的吸收, 还需研究微藻对不同氮氧化物的代谢能力; (3) 微藻的分子生物学和遗传改造研究, 可以采用传统诱变技术进行改造, 也可在研究其能量和物质代谢基础上通过基因工程改良藻种品质. 在实践中, 对自然藻种的驯化是获得优质藻种的重要途径. 需要指出的是, 大量实践证明, 许多在实验室条件下表现较好的藻种并不适合在室外扩大培养, 藻种的环境适应性和抗逆性也是其综合性能的重要方面.

4.2 规模养殖与光生物反应器技术

微藻的规模养殖技术和光生物反应器技术是微藻生物能源技术的核心环节, 也是目前该领域的技术瓶颈^[27, 28]. 许多微藻高效率和高含油量的数据均为实验室小规模养殖结果. 微藻养殖中的放大效应十分显著, 许多优良的藻种在扩大养殖中呈现出不同方面的严重问题, 如病虫害、生长速度显著变慢、含油量明显降低等. 因此, 有关微藻在大规模养殖环境下的生长规律与生理生态, 目前的认识还比较肤浅, 难以在较大规模下高效率地获得高油脂含量的微藻生物量^[29].

制约微藻生物能源技术发展的主要障碍是规模养殖, 目前缺乏技术可行、经济合理的能源微藻大规模养殖工艺模式. 尽管国内外研究已经证明, 可以实现产油微藻的规模养殖并获得藻油, 但以目前的开放池技术或封闭式光生物反应器技术养殖能源微藻, 无论是成本还是能耗均无法满足能源微藻生产的要

求。微藻的规模养殖技术涉及生物技术与过程工程技术的结合, 是一个崭新的领域, 需要开展大量艰巨的、基础性的探索工作。通过减排工业废气与生产微藻生物能源集成, 大大降低了原料成本(碳肥和氮肥), 甚至对废气和废水的利用还会带来收益。但是, 如何提高微藻生长效率、降低能耗、提高规模生产的可靠性仍是面临的艰巨任务。

无论针对何种规模养殖技术, 最终目的是降低成本、提高效率。微藻生物能源技术能否工业实施在很大程度上取决于微藻规模养殖技术的不断进步。该环节所涉及的技术问题主要包括 5 个方面: (1) 传光, 这是微藻扩大养殖后主要的生长限制因素, 因此需要有效解决光的利用问题, 核心是设计科学的养殖模式避免因藻液浓度升高而导致藻细胞相互遮挡, 并巧妙利用“光暗周期效应”^[30]提高微藻光合作用效率; (2) 传动与传质, 主要解决光生物反应器中气体有效分布以及各种营养与代谢产物的传递与混和效率的问题, 保证反应器内介质既能顺利流动、混合, 又不至于损伤微藻细胞, 核心是能耗的降低; (3) 传热, 即光生物反应器中温度控制技术, 温度是影响微藻生长的重要因素, 此外, 微藻生长还与水分的蒸发密切相关, 因此, 不仅应较好地控制养殖过程中藻液的温度, 而且必须考虑水的消耗; (4) 清洁, 主要是对光生物反应器中微藻黏附及生物污垢的避免或清洗工艺的研究, 以保证微藻的养殖能够长期稳定运行; (5) 病虫害防治技术与诱导产油技术, 微藻规模养殖过程中极易发生严重的病虫害, 这是所有规模生物养殖中存在的共性问题, 实践经验表明, 藻种的优劣对于这一问题的解决起着至关重要的作用, 但必须开发可靠的综合防治技术, 避免病虫害的集中爆发, 提高规模养殖的可靠性。如何通过养殖工艺提高微藻的油脂含量也是极其重要的问题, 此问题严重依赖于藻种的优劣, 另外诱导控制技术对于提高微藻油脂含量也十分重要。通过对以上 5 个方面的深入、系统研究, 不断提高光生物反应器技术与微藻规模养殖技术的水平, 最终达到提高效率、降低成本的目的, 推动微藻生物能源技术不断发展。

4.3 能源微藻加工利用技术

获得微藻生物质后, 还需经过一系列的加工提炼才能得到所需要的生物能源, 这一过程的成本占

总成本的 50% 左右^[8]。因此, 能源微藻生物加工技术也是整个微藻生物能源技术的重要环节, 其主要包含 3 方面内容: (1) 微藻生物质的收集技术, 通常微藻在培养液中的浓度较低(1~3 wt%), 尤其是在开放池培养系统中, 因此, 需采用过滤、沉降、离心分离或其他手段将微藻从大量水中分离出来后再进行后续加工处理, 尽管存在可用的成熟技术, 但这些技术能耗太高, 需另辟蹊径, 自动化、连续化、低能耗是这一技术环节的主要目标; (2) 微藻生物质的加工处理技术, 收集到的微藻需进一步加工处理将其中的油脂提取出来, “机械压榨”和“溶剂萃取”是通常采用的方法, 在处理之前, 微藻生物质需干燥以将其中的水分控制在一定范围内, 此环节的能耗较高, 其程度用于生产能源不可接受, 因此, 必须开发不经干燥而直接从含水微藻生物质中获取油脂的技术^[5], 微藻生物质被提取脂肪后, 剩下的淀粉、蛋白质和纤维素仍是宝贵的生物资源, 可继续加工处理以获得更高的价值; (3) 生物柴油加工技术, “酯交换反应”和“加氢处理”是两个重要的生物柴油加工技术, 植物中的脂肪经过酯交换反应制取生物柴油的技术相对成熟, 通常采用酸、碱或脂肪酶为催化剂催化甲醇与植物脂肪反应获得脂肪酸甲酯(生物柴油)和甘油, 不采用任何催化剂的“高压酯交换”工艺最近也取得了很好的进展, 然而, 微藻生物柴油具有常见动植物油脂不具备的特点, 其含有丰富的含 4 个或更多双键的多不饱和脂肪酸, 如二十碳五烯酸(EPA, C20, 5n-3, 5 个双键)和二十二碳六烯酸(DHA, C22, 6n-3, 6 个双键), 双键的存在导致微藻生物柴油在储运过程中被氧化而不稳定, 因此, 除常规酯交换工艺路线外, 将微藻油脂进行预处理以分离 EPA 和 DHA 等高附加值产品, 然后再通过酯交换生产生物柴油十分必要。此外, “加氢处理”对于微藻生物柴油加工技术也十分重要, 加氢处理得到的生物柴油具有更好的稳定性。

除此之外, 直接利用含水的微藻生物质通过微生物发酵生产沼气也是微藻生物能源技术值得关注的方向。该技术路线规避了微藻脱水以及必须选育高含油量微藻藻种的问题, 只要能高效率地获得微藻生物质即能满足工艺要求, 得到的沼气作为生物能源便于分离与利用。中国科学院青岛能源所开展了此方向的研究, 中国海洋总公司微藻生物能源项目采用的也是这一技术路线。

4.4 微藻生物质综合利用技术

微藻生物质是宝贵的生物资源,除了提取油脂以加工生物柴油外,其中的淀粉、纤维素和蛋白质均可经过进一步加工获得更高的效益^[31~33].最简单的方式是将提取了油脂的微藻生物质制成藻饼用作动物饲料,其含有丰富的碳水化合物和蛋白质.此外,微藻中淀粉和纤维素也可进一步发酵以制取生物乙醇燃料,而其他成分经过深加工还可制取高附加值的医药产品和精细化学品.

“生物炼厂-微藻生物质的综合利用”是微藻生物能源技术发展可选的最佳路线之一.与现在的石油炼油厂相似,生物炼油厂以生物质原料代替原油,经过一系列加工过程充分利用生物质原料的每种成分,生产有用的产品,最后,不能被加工的残渣还可通过厌氧发酵或直接焚烧用以生产电力或热力.由于微藻生物质的每种成分均可加工利用,所以,总的生产成本得到显著降低.目前,生物炼油厂的概念在美国、加拿大和德国等从事生物柴油以及生物乙醇生产的工厂中已得到应用.

发展微藻生物能源产业需要 CO₂、阳光、土地和水 4 种资源,但同时具备这 4 种条件的地区有限.阳光资源免费,CO₂ 和水通过废气和废水的利用也容易解决,但规模养殖微藻需要大量的土地.一般认为,沿海的滩涂和沙漠地区较为合适,一些难以进行农林开发的边际土地也是发展微藻养殖产业的理想地域.因此,有必要进行专门调查,寻找我国适合发展微藻生物能源的地区,同时,政府也应给予相关政策的扶植,微藻生物能源产业才能健康发展.

5 中国石化减排温室气体与微藻生物能源集成的实践

中国石化于 2010 年启动了“微藻生物柴油成套技术的研发”项目,与中国科学院合作进行产油微藻藻种的全面筛查、选育、微藻规模养殖技术的开发、光生物反应器技术的开发以及微藻采收和微藻生物质加工技术的开发,并在中国石化石家庄炼化分公司建设了一套利用炼厂排放烟气养殖产油微藻的示范装置,促进中国石化“绿色低碳发展战略”的实践.

5.1 高产油藻种筛选及遗传改良

“微藻生物柴油成套技术的研发”项目开展以来,

在我国内陆淡水水体、荒漠地区和近海海域等各类生境分离微藻 1300 余株,已测定 18S rRNA 序列的有 450 余株,油脂含量达 30% 及以上的有 90 余株,达 40% 以上的有 10 株,部分藻种的显微照片如图 2 所示.其中一些产油藻株具有规模养殖潜力,许多藻株具有耐盐碱能力,对于规模养殖十分有利.

对一些具有优良性状的微藻建立了基因转移方法,进行基因改造得到了油脂含量提高且生长速率也较野生株略有加快的藻株,还获得了脂肪酸不饱和度发生显著变化的藻株,其有利于生物柴油的生产.

5.2 开放池规模养殖技术的开发

利用跑道池开展了小球藻和栅藻分批培养实验(图 3),小球藻生物质平均产率为 10.8 g/(m² d),油脂含量为 23%;栅藻生物质平均产率为 7.9 g/(m² d),油脂含量为 26.5%,初步建立了藻种扩大培养、培养池分批培养、沉降浓缩、离心脱水的培养工艺.

开展了产油微藻海水规模养殖技术的开发,在面积不断放大的开放池中培养微藻(图 4).在 20 m²

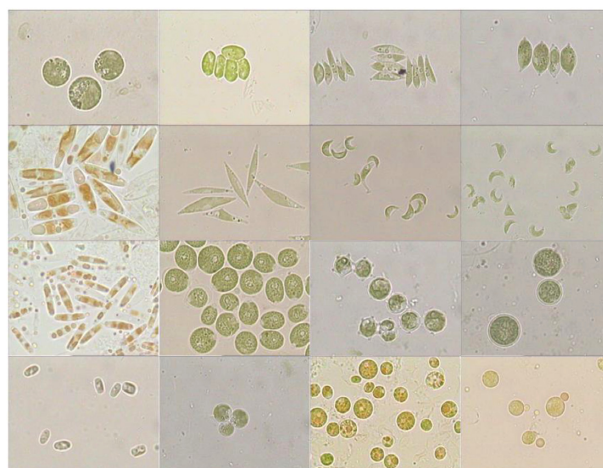


图 2 筛选的部分藻种的显微照片



图 3 小球藻和栅藻培养池



图 4 面积不断放大的海水开放式养殖池

开放池中连续培养 3 个月, 165-01 株系最高产率为 $20.65 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$, 平均产率为 $10.58 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$; 在 240 m^2 开放池中连续培养 24 d, 最高产率为 $20.78 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$, 平均产率为 $7.79 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$; 在 360 m^2 开放池中连续培养 5 d, 最高产率为 $15.98 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$, 平均产率达到了 $14.86 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$. 培养期间, 165-01 株系的含油量可在不影响生长的情况下维持在 40% 以上, 并实现了低成本采收和培养基的循环使用.

5.3 利用炼油厂排放的烟气养殖产油微藻

2012 年 8 月, 在中国石化石家庄炼化分公司建成了 500 m^2 微藻烟气减排示范装置(图 5). 该示范装置基于 2011 年中国石化启动的微藻用于炼厂减排的示范装置建设项目以及石油化工科学研究院承担的国家科技部 973 计划“高效绿色炼油技术的化学和工

程基础”, 目的在于开发相关成套技术, 在减排温室气体的同时对微藻进行综合利用, 获取高附加值产品, 开发微藻减排温室气体的工程技术.

该综合示范装置包括 20000 L 封闭式光生物反应器以及两个 50 m^2 开放式跑道池, 可以直接利用炼厂烟气. 装置年开工时间为 8400 h , 利用的烟气相关参数为: 常温; 0.2 MPa ; 流量为 100 kg CO_2 (设计)/d; 烟道气组成为 CO_2 含量 16%, SO_2 6 ppm, CO 6 ppm, 氮氧化物 36 ppm, 氧气 6.4%, 水蒸气 12.6%, N_2 65%. 该示范装置的培养流程如图 6 所示.

图 7 为将烟气直接通入藻液中产油微藻的生长曲线, 结果表明, 通入烟气的小球藻生长速率较大, 选育的微藻对烟气具有耐受性, 而且可以利用其中的碳源和氮源, 为微藻减排的可行性提供依据. 利用 $\text{NaNO}_3/\text{NaNO}_2$ 模拟烟气中 NO_x 条件, 研究小球藻对



图 5 中国石化石家庄炼化分公司微藻减排温室气体示范装置

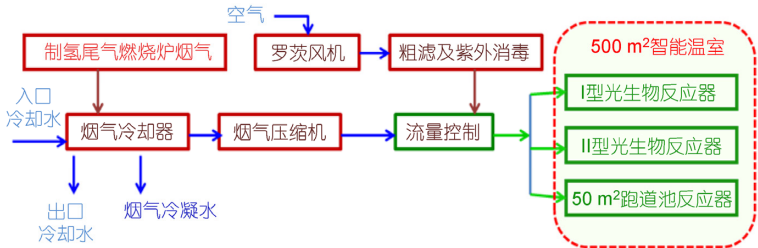


图 6 微藻烟气减排流程图

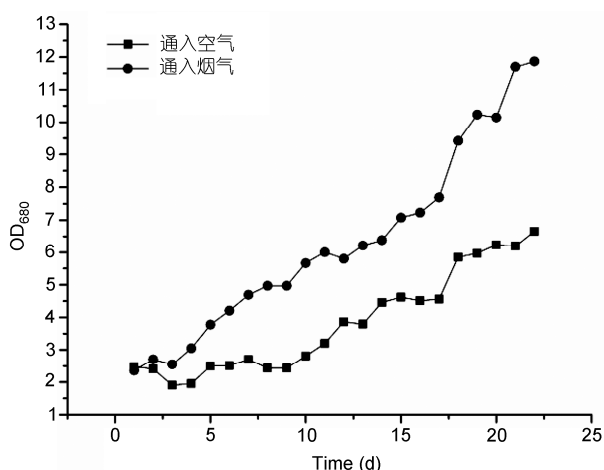


图7 小球藻的生长曲线

不同浓度 NaNO_2 的适应性情况. 研究发现, 培养基中添加不同浓度 NaNO_2 后细胞仍继续生长, 并且相对缺氮条件, 生物量有了显著提高. 烟气中的气体为微藻的生长提供了碳源和氮源. 上述实验结果证明, 利用“微藻减排炼油厂排放的温室气体”在技术上可行. 为了进一步验证其在技术经济上是否合理, 选择

中国石化石家庄炼化分公司 16 万 t/a 己内酰胺生产装置的尾气处理系统作为对比, 开发微藻脱硝成套技术, 并在中试规模取得完整的数据, 与“选择性催化还原脱硝”技术进行全面的技术经济对比, 以便认识这项技术的应用前景.

6 总结与展望

微藻生物能源是具有发展前途的新兴产业. 开展微藻生物柴油技术的研究不仅可以提高我国多个相关学科的基础研究水平, 还可从根本上解决生物质能源的“原料”问题, 同时减排温室气体. 微藻生物能源技术可以结合废气和废水处理, 吸收和固定含氮化合物, 产生更好的环境效益和社会效益. 通过减排温室气体与微藻生物能源的集成, 将传统的炼油工业与生物能源生产相结合, 减少了废气、废水排放, 同时又生产了可再生的微藻生物能源, 形成了封闭的循环, 出口只有清洁燃料. 随着微藻生物能源技术的不断进步, 微藻生物能源将逐渐在技术经济上合理可行.

致谢 本工作得到国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2012CB224803)资助, 特此致谢. 此外, 感谢审稿专家提出的宝贵意见, 以及闵恩泽院士对微藻生物能源技术研究工作的指导与支持.

参考文献

- 1 闵恩泽, 姚志龙. 近年生物柴油产业的发展——特色、困境和对策. *化学进展*, 2007, 19: 1050–1059
- 2 姚国欣, 王建国. 第二代和第三代生物燃料发展现状及启示. *中外能源*, 2010, 15: 23–37
- 3 Isaac Berzin. Synthetic and biologically-derived products produced using biomass produced by photobioreactors configured for mitigation of pollutants in flue gases. US Patent 0239182 A1, 2005-10-27
- 4 Tsukahara K, Sawayama S. Liquid fuel production using microalgae. *J Jpn Petrol Inst*, 2005, 48: 251–259
- 5 陈峰, 姜悦. 微藻生物技术. 北京: 中国轻工业出版社, 1999
- 6 Doucha J, Lívanský K. Outdoor open thin-layer microalgal photobioreactor: Potential productivity. *J Appl Phycol*, 2009, 21: 111–117
- 7 王长海, 鞠宝, 董言梓, 郭尽力. 光生物反应器及其研究进展. *海洋通报*, 1998, 17: 79–86
- 8 Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv*, 2007, 25: 294–306
- 9 Malcata FX. Microalgae and biofuels: A promising partnership? *Trends Biotechnol*, 2011, 29: 542–549
- 10 Perez-Garcia O, Escalante FME, de-Bashan LE, Bashan Y. Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. *Water Res*, 2011, 45: 11–36
- 11 Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, Roessler P. *A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program-biodiesel from Algae*. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1998
- 12 徐旭东. 微藻燃料, 能源危机的出口? *科学时报*, 2008-11-04
- 13 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(工业生物技术专刊)*, 2009, 5: 64–70
- 14 Ritzkowski M, Stegmann R. Controlling greenhouse gas emissions through landfill *in situ* aeration. *Int J Greenh Gas Con*, 2007, 1: 281–288
- 15 林而达, 刘颖杰. 温室气体排放和气候变化新情景研究的最新进展. *中国农业科学*, 2008, 6: 1700–1707
- 16 杨建龙. 中国经济结构变动的趋势分析. *中国总会计师*, 2005, 1: 19–20
- 17 联合国. 联合国气候变化框架公约. 京都议定书, 1998
- 18 Chiu SY, Kao CY, Huang TT, Lin CJ, Ong SC, Chen CD, Chang JS, Lin CS. Microalgal biomass production and on-site bioremediation of

- carbon dioxide, nitrogen oxide and sulfur dioxide from flue gas using *Chlorella* sp. cultures. *Bioresour Technol*, 2011, 102: 9135–9142
- 19 艾萨克·伯津. 生产生物物质和减少烟道气中污染物所用的光生物反应器和工艺过程. 中国专利, CN1668185A, 2005
- 20 Chen HW, Yang TS, Chen MJ, Chang YC, Lin CY, Wang EIC, Ho CL, Huang KM, Yu CC, Yang FL, Wu SH, Lu YC, Chao LKP. Application of power plant flue gas in a photobioreactor to grow *Spirulina* algae, and a bioactivity analysis of the algal water-soluble polysaccharides. *Bioresour Technol*, 2012, 120: 256–263
- 21 华汝成. 单细胞藻类的培养与利用. 北京: 农业出版社, 1986
- 22 孙溢. 几种海洋微藻的氨基酸含量. 氨基酸和生物资源, 1995, 17: 38–40
- 23 李铁, 胡立阁, 史致丽. 营养盐对中肋骨条藻和新月菱形藻生长及氮磷组成的影响. 海洋与湖沼, 2000, 31: 46–52
- 24 Li YQ, Horsman M, Wang B, Wu N, Lan CQ. Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2008, 81: 629–636
- 25 Rao AR, Dayananda C, Sarada R, Shamala TR, Ravishankar GA. Effect of salinity on growth of green alga *Botryococcus braunii* and its constituents. *Bioresour Technol*, 2007, 98: 560–564
- 26 欧阳峥嵘, 温小斌, 耿亚红, 梅洪, 胡鸿钧, 张桂艳, 李夜光. 光照强度、温度、pH、盐度对小球藻(*Chlorella*)光合作用的影响. 武汉植物学研究, 2010, 28: 49–55
- 27 Bitog JP, Lee IB, Lee CG, Kim KS, Hwang HS, Hong SW, Seo IH, Kwon KS, Mostafa E. Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review. *Comput Electron Agr*, 2011, 76: 131–147
- 28 Wang B, Lan CQ, Horsman M. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnol Adv*, 2012, 30: 904–912
- 29 Zhu J, Rong J, Zong B. Factors in mass cultivation of microalgae for biodiesel. *Chinese J Catal*, 2013, 34: 80–100
- 30 薛升长. 基于微藻闪光效应的光生物反应器的设计方法. 博士学位论文. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2011
- 31 Brennan L, Owende P. Biofuels from microalgae: A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew Sust Energ Rev*, 2010, 14: 557–577
- 32 Chen GQ, Jiang Y, Chen F. Fatty acid and lipid class composition of the eicosapentaenoic acid-producing microalga, *Nitzschia* *Food Chem*, 2007, 104: 1580–1585
- 33 宋东辉, 侯李君, 施定基. 生物柴油原料资源高油脂微藻的开发利用. 生物工程学报, 2008, 24: 341–348

Integration of greenhouse gas reduction and algae bio-energy technology

BI JianGuo¹, LIU XiaoXin¹, ZHU JunYing², RONG JunFeng², ZONG BaoNing^{2*}, Gao Hong³, GENG YaHong⁴, XIANG WenZhou⁵

1 Sinopec Shijiazhuang Refining and Chemical Company, Shijiazhuang 050099, China

2 Research Institute of Petroleum Processing, SINOPEC, Beijing 100083, China

3 Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

4 Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China

5 South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

*Corresponding author (email: zongbn.ripp@sinopec.com)

Abstract: Biofuels can be obtained from a variety of sources, and microalgae are of particular interest as one of the most promising sources of biomass for biofuels. In this review, the potential and problem of microalgae bio-energy are analyzed, which indicates that the mode of mass cultivation of microalgae, including improving the growth of microalgae, reducing the energy consumption and enhancing the reliability of mass cultivation of microalgae, is still the main task. Here we introduced the strategy to integrate microalgae bio-energy technology with greenhouse gas reduction in SINOPEC. Besides, the key technologies employed in microalgae bio-energy and the on-going projects of utilizing greenhouse gases to develop microalgae bio-energy in Sinopec Shijiazhuang Refining and Chemical Company, including isolation and characterization of microalgae species, photobioreactors and application of microalgae biomass, are described.

Keywords: algae, bio-energy, greenhouse gas reduction, commercial integration