

技术进展

利用微藻技术减排二氧化碳的研究进展

杨忠华¹, 陈明明¹, 曾 嵘², 李轩科¹, 刘郭飞¹

(1. 武汉科技大学化学工程与技术学院, 湖北 武汉 430081; 2. 湖北大学化学化工学院, 湖北 武汉 430062)

摘要:控制温室气体 CO₂ 的排放已经成为全球环境研究的热点问题。对当前国内外利用微藻技术固定 CO₂ 以达到 CO₂ 减排的研究现状进行了综述,重点从可高效固定 CO₂ 藻种的筛选与育种、微藻固定 CO₂ 的机制、工业过程开发以及所产生藻体的综合利用等几方面进行了归纳和分析。

关键词:微藻; 二氧化碳减排; 二氧化碳固定

中图分类号: TQ033

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)08-0015-05

Recent progress in fixation of carbon dioxide by microalgae

YANG Zhong-hua¹, CHEN Ming-ming¹, ZENG Rong², LI Xuan-ke¹, LIU Guo-fei¹

(1. College of Chemical Engineering and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: With the Kyoto Protocol entering into force, the emission reduction levels of greenhouse gas, especially carbon dioxide, has attracted more and more important attention from governments and enterprises globally. It becomes a hot topic in environmental research fields. The recent progress in carbon dioxide fixation by microalgae is reviewed in this paper. The following research fields, such as screening and breeding of microalgae with high capability of carbon dioxide fixation, the mechanism of carbon dioxide fixation by microalgae, the process development of carbon dioxide fixation by microalgae, and the comprehensive utilization of microalgae after carbon dioxide fixation done, are discussed respectively.

Key words: microalgae; carbon dioxide emission reduction; carbon dioxide fixation

近年频发的自然灾害与全球气候变暖密切相关,如不加以控制将严重威胁人类的生存和发展^[1-2]。全球气候变暖已成为各国政府、学术界以及企业界关注的焦点之一。国际上对气候变化的关注导致了联合国气候变化框架公约(UNFCCC)的问世,并于 2005 年实施的《京都议定书》对各国承担温室气体特别是 CO₂ 减排的义务进行了明确规定。目前,欧美等国家已经开始征收 CO₂ 排放税,并通过清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)项目向发展中国家提供资金和技术进行 CO₂ 排放权交易^[3]。实施 CO₂ 减排项目至少可以获得两方面的效益:一是可通过 CDM 项目获得不菲经济效益;二是减少 CO₂ 排放量可以改善当地气候条件,具有相当重要的环境效益和社会效益。因此,在满足社会发展的能源需求的基础上,有效控制 CO₂ 排放,已成为各国所要解决的重大项目之一^[4]。当前国内外对 CO₂ 的减排进行了大量研究,获得了许多很有价值的研究成果。本文将对此进行归纳,特别对利用微

藻技术固定 CO₂ 以达到 CO₂ 的减排进行较详细的综述。

1 国内外二氧化碳减排技术进展

目前用于减少 CO₂ 排放的途径主要有 3 类:①提高能源效率。通过改进技术,更有效利用能源,以减少能源的使用,进而达到减少温室气体的排放目的。②替代能源。开发低碳和无碳能源技术,如太阳能、风能、核能、水电等。③固存和转化。采用各种物理、化学以及生物方法对 CO₂ 进行收集、浓缩、储存、固定和转化。

温室气体的固存和转化成为目前各国实现 CO₂ 减排的研究热点。依据现行技术的特性分类,大致可分为物理 CO₂ 固定法、化学 CO₂ 固定法和生物 CO₂ 固定法三大类。

1.1 物理固定法

CO₂ 物理固定法主要有:海洋深层储存法和陆地蓄水层(或废油、气井)储存法等。地下和海洋深

收稿日期:2008-04-21

基金项目:武汉市青年科技晨光计划(200750731288)资助项目

作者简介:杨忠华(1976-),男,博士,副教授,主要从事生物环保、生物催化等方面的研究,027-86563448, yangdragon@wust.edu.cn.

处固存具有巨大的潜力,可阻止或显著减少 CO₂ 向大气中的人为排放,对减少 CO₂ 人为排放、控制全球气候变化起到重要的作用。很多国家都积极参与了这种大规模的碳固存技术的研究与实施,并取得了显著效果。不过,这种碳固存技术除了埋存的稳定性问题以及收集、纯化、浓缩成本较高之外,还潜在着地下水、地层、海洋生物圈以及气候等方面的风险,需要更深入的研究^[5-7]。

1.2 化学固定法

CO₂ 化学固定技术主要有以下几类:①利用乙醇胺类吸收剂对 CO₂ 进行分离回收^[8];②CO₂ 与 H₂、CH₄、H₂O、CH₃OH 等反应分别合成甲醇、C₂ 烃、合成气、碳酸二甲酯等许多有价值的化学品^[9];③将 CO₂ 插入到金属、碳、硅、氢、氧、氮、磷、卤素等元素组成的化学键中,以制备各种羧酸或羧酸盐、氨基甲酸酯、碳酸酯、有机硅、有机磷化合物^[10];④CO₂ 和环氧化物共聚成新型 CO₂ 树脂材料^[11]。化学固定法常需纯的 CO₂,而排放的 CO₂ 纯度一般只有 20% 左右,这就需要昂贵的分离成本。再加上 CO₂ 本身比较稳定,因此如何利用这个巨大的碳源来解决全球资源危机并实现减排,仍然面临巨大的挑战。

1.3 生物固定法

生物 CO₂ 固定法是地球上最主要和最有效的固碳方式,在碳循环中起决定作用,利用此法来进行 CO₂ 减排,符合自然界循环和节省能源的理想方式。香山科学会议第 279 次学术讨论会与专家专家认为,生物固碳是最安全有效、经济的固碳工程。能利用该法进行固碳的主要是植物、光合细菌以及藻类。微藻具有光合速率高、繁殖快、环境适应性强、处理

效率高、可调控以及易与其他工程技术集成等优点,且可获得高效、立体、高密度的培养技术,同时固碳后产生大量的藻体具有很好的利用价值,因此具有高度的工业化潜力。故微藻 CO₂ 固定有望成为一种具有相当可行性和经济价值的 CO₂ 固定方法^[12]。

从持续发展的角度来看,生物 CO₂ 固定技术,尤其是微藻减排 CO₂ 技术,更具环保、经济、彻底、符合自然界循环的独特优势,为人类解决能源、环境问题提供了一条全新而有效的固碳模式,受到国内外研究者的高度重视。

2 微藻减排二氧化碳的研究进展

近些年国内外对微藻固定 CO₂ 技术的研究主要从 3 个方面开展:①筛选和培育高效、耐高 CO₂ 浓度及抗污染的藻种;②结合其他领域新技术,开发新型高效光生物反应器和工艺过程;③在固碳的过程中利用微藻本身代谢特点,同时生产高价值生物燃料或高附加值有用物质。

2.1 藻种的选育

藻种的要求与其应用的环境密切相关,用于密闭空间(如宇航舱等)的微量 CO₂(体积分数 < 0.1%) 的去所选择的微藻通常要求对 CO₂ 转化率高、比生长速率快、耐 pH 范围宽;而用于烟道气中 CO₂(体积分数 10% ~ 30%) 固定的微藻,除要求具有高效的 CO₂ 固定能力外,还要求能耐较高 CO₂ 浓度和温度、以及 NO_x 和 SO_x 等其他气体组分。针对不同的应用环境,国内外研究者对用于固定 CO₂ 的微藻进行了大量的筛选和育种工作,获得了许多有价值的藻种。表 1 中列出了部分具有工业应用潜力的藻种。

表 1 国内外部分耐受高 CO₂ 藻种列表

藻种名称	结果	文献
<i>Synechococcus leopoliensis</i>	在 5% (体积分数,下同) CO ₂ 下的 CO ₂ 吸收率最高	[13]
<i>Chlorella</i> sp. NTU-H15	从 200 多种微藻中筛选出,能在 40% 下生长,pH 和温度范围较宽	[14]
<i>Chlorococum littorale</i>	0.03% ~ 40.00% CO ₂ 下都能生长,5% 时生长最好	[15]
<i>Chlorella vulgaris</i>	在 10%、20% 与 30% CO ₂ 下都能较好地生长	[16]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	5% CO ₂ 下固定 CO ₂ ,并生产 α-亚麻酸	[17]
<i>Scenedesmus obliquus</i>	从煤火电厂的废物处理池中分离出,18% CO ₂ 下仍生长较好,12% 有最大生物量	[18]
<i>Chlorella Kessleri</i>	从煤火电厂的废物处理池中分离出,18% CO ₂ 下仍生长较好,6% 有最大生物量	[18-19]
<i>Spirulina</i> sp.	不加入重碳酸盐,6% CO ₂ 下生长最好,18% CO ₂ 也能生长	[18-19]
<i>Chlorella</i> sp. KR-1	能够耐受最高 CO ₂ 体积分数为 40%,10% CO ₂ 下生长最好	[20]
<i>Chlorella</i> sp. ZY-1	在 10% CO ₂ 下生长最快,能耐受 CO ₂ 体积分数达 70%	[21]

Hanagata 等通过筛选得到了 5 种能耐受高 CO_2 浓度的淡水绿藻,其中以斜生栅藻和小球藻效果最好,但斜生栅藻比小球藻能耐受更高 CO_2 的浓度,而小球藻能耐受更高的温度^[22]。Sung 等筛选出的小球藻 *Chlorella sp.* KR-1 在高 CO_2 浓度及高温下显示了极好的 CO_2 固定性能,在体积分数高达 30% 的 CO_2 和 40℃ 的条件下仍能正常生长,同时具有很宽的 pH 耐受范围,适于高密度培养,因此适合于固定烟道气中的 CO_2 ^[20]。他们进一步研究了烟道气中的有毒化合物 SO_x 和 NO_x 对 *Chlorella sp.* KR-1 的影响,其研究显示该藻具有较好的 SO_x 和 NO_x 耐受能力,这表明 *Chlorella sp.* KR-1 用于真实燃烧气的 CO_2 固定是可行的^[23]。

为了在 CO_2 固定的同时处理其他废弃物,de Morais 等从热电厂的废物处理池中分离出了 *Scenedesmus obliquus* 和 *Chlorella kessleri*,测定了它们在不同 CO_2 浓度下的生长特性,在 CO_2 体积分数为 18% 时仍有很好的生长速率,最大比生长速率 (μ_{\max}) 可达 0.267 d^{-1} ,细胞质量浓度达 1 g/L ^[24]。除了可用于固定 CO_2 之外,还有望用来处理废水。Pascucci 等利用普通小球藻来处理各种水介质中的二价 Cd、Cu、Fe、Ni、Pb 和 Zn 的配合物,结果表明普通小球藻能够同时去除海水、处理废水或者饮用水中的金属离子^[25]。有些研究者将固定 CO_2 和处理废水结合在一起,筛选出能同时固定 CO_2 和处理废水的微藻。Yun 等将 *C. vulgaris* 培养在钢厂废水中,建立一种在固定烟道气中的 CO_2 的同时移除废水中的氨氮的工艺流程^[26]。

为了获得能耐受更高 CO_2 浓度和固定效率的藻种,一些研究者利用物理诱变和化学等诱变方法对已有的藻种进行诱变育种,以提高 CO_2 的耐受能力和固定效率^[27]。References 等^[28]以及宋立荣等^[29]利用甲基磺酸乙酯(EMS)为诱变剂对蓝藻聚球藻进行化学诱变,获得了耐受更高浓度 CO_2 的突变菌株。此外,对高产蛋白核突变株、抗性突变株、耐高温等突变株的选育也很常见。张学成等利用单细胞分离技术和紫外诱变育种技术,获得高产高蛋白的小球藻株 *Chlorella vulgaris* Q7^[30]。由此可见,通过诱变获得同时耐受高 CO_2 及具有其他特性(如高蛋白、耐高温、耐酸碱等)的突变株也是可能的,这使得在高效固定 CO_2 的同时也能获得很高的藻类附加值。

藻类的基因工程研究逐渐成为国际上的研究热点,研究内容之一是培育新品种,利用转基因藻类反

应器生产有用产品和清除污染。刘广发等将从极端耐盐的假单胞杆菌中克隆得到的转录调控因子基因、NADH 脱氢酶 II 基因和磷酸甘油磷酸酯酶基因转入蓝藻 *Synechococcus sp.* PCC 7942 中,使受体藻对 NaCl 的耐受性从低于 2.5% 显著提高到 4.5%^[31]。可见,从基因工程研究中获得耐高温、耐酸碱及耐高 CO_2 浓度等的优良固碳藻种具有极大的可行性和应用价值。

2.2 固定机制

微藻大多数是专性光合自养生物,利用无机碳通过光合作用转化为生物质,其光合作用强度大大超过同等质量的植物的代谢总量。它从溶于水中的无机碳中获取碳源,如 CO_2 、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 及 CO_3^{2-} 等型态,各型态所占比例因 pH 不同而异,但不是每种无机碳型态都能被微藻所固定转化。 CO_2 是微藻可利用的型态, HCO_3^- 的利用与藻种类别和环境条件有关,而 H_2CO_3 和 CO_3^{2-} 型态微藻无法利用。许多研究者为了探索外界环境中的无机碳是如何进入细胞内的奥秘,提出了不同的无机碳转运模型。邱保胜等对蓝藻的 CO_2 浓缩机制(CCM)进行了归纳综述,指出了 HCO_3^- 、 CO_2 的转运模式以及 Na^+ 、羧体对 CO_2 固定的影响^[32]。夏建荣等对绿藻的 CO_2 浓缩机制进行了综述,介绍了多种绿藻的无机碳转移模型,同时评述了各模型的优缺点^[33]。可以看出,不同种微藻碳转移途径都有差异,各种模型也未能完整地揭示藻类 CCM 机制,这还需进一步探索。

2.3 工艺研究

要使选育得到的优良藻种在实际应用中获得很高的 CO_2 固定效果,其合理的工艺工程条件也是不可少的。要做到微藻高密度培养、高效率的 CO_2 固定效果,这依赖于高效光生物反应器的设计。光生物反应器优化设计主要依赖于 3 个参数:比表面积、气液传质效率和光源设计。这 3 个方面直接决定了微藻 CO_2 固定效率的高低,也是实现工业化的关键。当前国内外对此也进行了一些研究,取得了可观的成果。

(1)比表面积。光生物反应器有开放式的,也有密闭式的。开放式的比表面积较大,也较经济,适合于工业上建造大型的光生物反应系统。密闭式主要分管式、板式和锥式 3 类,适合于微藻的高密度培养。岳丽宏等设计了 3 种密闭式光生物反应器:圆锥形螺旋盘管式光生物反应器、圆柱形螺旋盘管式光生物反应器及平板式光生物反应器^[34]。这 3 种

反应器都属于气升式反应器,且都具有较大的吸光面积,而固定 CO₂ 效率却以圆柱形螺旋盘管式结构的光生物反应器为佳。

(2)气液传质效率。一般通过附属器件结构来改善微藻培养过程中气液传质效果,如气液交换器、冷凝器、超滤装置、混合装置以及营养物的供应装置。程丽华等采用在光生物反应器旁串接中空纤维膜组件的方法改善气体传质效果^[35]。可使气泡更加细密均一,同时气泡在藻液中的停留时间从原来的 2 s 增加到 20 s,使得微藻固定 CO₂ 效率提高了 5 倍。

(3)光源设计。光源的设计不仅要考虑高效光源选择,还要考虑光源的设置方式,即光线在反应器内的有效分布。太阳光和普通的荧光灯是最常用的光源,也有些光生物反应器选用发光二极管、光导纤维、闪光灯等作为光源,但是从环境、社会和经济效益的方面来考虑,以太阳光作为光源的高效光生物反应器的开发就显得更有意义。Hirata 等设计了带有太阳光收集装置的光生物反应器,利用小球藻固定 CO₂,获得了很好的效果,充分利用了太阳光,避免能量的额外消耗^[36]。光源的设置可分为外置式和内置式 2 种,以外置式较为常见。徐明芳等对光反应器的结构分析显示,藻细胞对光能的吸收和转化受反应器采光表面积、藻液层厚度、藻细胞浓度等因素影响^[37]。

2.4 综合利用

微藻在固定 CO₂ 的同时会产生大量的藻体,如不对藻体加以综合利用必然会带来污染。如开发合适的综合利用途径不仅可以避免二次污染,还可降低过程成本。其综合利用主要包括在固定 CO₂ 的过程中利用微藻生产生物柴油等生物能源、藻体蛋白质等生物物质的利用。

Chae 等在新型光生物反应器中利用太阳光通过微藻 *Euglena gracilis* 固定烟道气中的 CO₂,同时生产高蛋白易消化的动物饲料,获得较好的效果,具有重要的意义^[38]。Israel 等利用红海藻 *Gracilaria cornea* 固定烟道气中 CO₂ 的同时进行 *Gracilaria cornea* 的培养,取得了有应用潜力的结果,使得培养成本大为降低^[39]。

此外,也可结合微藻本身价值,利用现代高新技术,将其转化为生物柴油等高价液体燃料,或生产有用物质如类脂和蛋白质,或作为提取高附加值药物原料等。Akimoto 等在光生物反应器中培养 *Chlamydomonas reinhardtii*,将 CO₂ 的固定和 α -亚麻

酸的生产结合起来,得到了高产量的 α -亚麻酸过程^[17]。Ghirardi 等利用微藻光合作用效率高、生长快、氢酶活性高、放氢时间长等特点,采用两步法间接光水解制氢工艺,用绿藻 *Chlamydomonas sp.* 制氢,可获得 10% 的太阳能转化效率^[40]。缪晓玲等利用流化床热解反应器对脂类含量高的小球藻 (*Chlorella protothecoides*) 和微囊藻 (*Microcystis*) 进行快速热解实验,分别获得 17.5% 和 23.7% 的生物柴油产率^[41]。Sawayama 等也证明微藻除了可以固定 CO₂ 之外,还能够用于生产生物石油^[42]。可见,微藻固定 CO₂ 的综合利用有着非常广阔的应用前景。

3 结语

微藻 CO₂ 固定技术具有重要社会效益和环境效益,尽管目前尚有许多的技术难题需要克服,但已引起了各国研究者的高度重视,微藻越来越多地应用于烟道气中 CO₂ 的固定、废水的处理以及高附加值产品的生产。如果能和其他高新技术相结合,将微藻 CO₂ 固定技术、微藻废水的处理以及微藻高附加值产品的生产这 3 种技术进行集成,则可为人类解决能源、健康、环境等问题提供了一条全新、经济而有效的固碳模式。

参考文献

- [1] 康棣华. 温室效应与厄尔尼诺现象问题[J]. 化学研究与应用, 1998(10): 327 - 330.
- [2] 张锐. 全球气候变暖: 扑向人类的最大杀手[J]. 观察家: 环球扫描, 2007(7): 30 - 33.
- [3] 胡迟. 《京都议定书》框架下的排放权交易[J]. 国际视野, 2007(6): 38 - 39.
- [4] 李明秀, 崔征. 应对气候变化: “节能减排”在行动[J]. 智囊: 中国企业社会责任, 2007(7): 50 - 51.
- [5] 张炜, 李义连. 二氧化碳储存技术的研究现状和展望[J]. 环境污染与防治, 2006, 28: 950 - 953.
- [6] 张树伟, 刘德顺. 碳封存技术的现状与发展[J]. 环境科学动态, 2005(4): 25 - 27.
- [7] 曾荣树, 孙枢, 陈代钊, 等. 减少二氧化碳向大气层的排放: 二氧化碳地下储存研究[J]. 中国科学基金, 2004(4): 196 - 200.
- [8] 毛松柏, 叶宁, 丁雅萍, 等. 烟道气中 CO₂ 回收新技术的开发和应用[J]. 煤化工, 2005, 30: 25 - 28.
- [9] 贾彦雷, 许文, 刘家祺. 二氧化碳的化学利用[J]. 天然气化工, 2004, 29: 54 - 58.
- [10] Rokicki A, Kuran W. Application of carbon dioxide as a direct material for polymer syntheses in polymerization and polycondensation reactions [J]. J Macromol Sci Rev Macromol Chem, 1981, C21: 135 - 186.
- [11] 林海琳, 崔英德, 王飞镛. 二氧化碳功能高分子材料的合成和应用研究[J]. 材料导报, 2004, 18: 55 - 57, 68.
- [12] Masakazu M, Masahiro I. The biological CO₂ fixation and utilization pro-

- ject by rite(2)-screening and breeding of microalgae with high capability in fixing CO₂[J]. *Energy Convers Manage*, 1997, 38:493 - 497.
- [13] Kajiwara S, Yamada H, Ohkuni N, *et al.* Design of the bioreactor for carbon dioxide fixation by *Synechococcus* PCC7942[J]. *Energy Convers Manage*, 1997, 38:529 - 532.
- [14] Chang E H, Yang S S. Some characteristics of microalgae isolated in taiwan for biofixation of carbon dioxide[J]. *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, 2003, 44:43 - 52.
- [15] Kurano N, Ikemoto H, Miyashita H, *et al.* Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis[J]. *Energy Convers Manage*, 1995, 36:689 - 692.
- [16] Jeong M L, Gillis J M, Hwang J Y. Carbon dioxide mitigation by microalgal photosynthesis[J]. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2003, 24:1763 - 1766.
- [17] Akimoto M, Yamada H, Ohtaguchi K, *et al.* Photoautotrophic cultivation of the green alga *chlamydomonas reinhardtii* as a method for carbon dioxide fixation and α -linolenic acid production[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1997, 74:181 - 183.
- [18] de Morais M G, Costa J A V. Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina sp.* cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactors[J]. *Biotechnol Lett*, 2007, 29:1349 - 1352.
- [19] de Morais M G, Costa J A V. Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina sp.* and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor[J]. *J Biotechnol*, 2007, 129:439 - 445.
- [20] Sung K D, Lee J S, Shin C S, *et al.* Isolation of a new highly CO₂ tolerant fresh water microalga *Chlorella sp.* KR-1[J]. *Korean J Chem Eng*, 1998, 15:449 - 450.
- [21] Yue L H, Chen W G. Isolation and determination of cultural characteristics of a new highly CO₂ tolerant fresh water microalgae[J]. *Energy Convers Manage*, 2005, 46:1868 - 1876.
- [22] Hanagata N, Takeuchi T, Fukujū Y, *et al.* Tolerance of microalgae to high CO₂ and high temperature[J]. *Phytochemistry*, 1992, 31:3345 - 3348.
- [23] Lee J S, Kim D K, Lee J P, *et al.* Effects of SO₂ and NO on growth of *Chlorella sp.* KR-1[J]. *Bioresour Technol*, 2002, 82:1 - 4.
- [24] de Morais M G, Costa J A V. Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide[J]. *Energy Convers Manage*, 2007, 48:2169 - 2173.
- [25] Pascucci P R, Kowalak A D. Metal distributions in complexes with *Chlorella vulgaris* in seawater and wastewater[J]. *Water Environ Res*, 1999, 71:1165 - 1170.
- [26] Yun Y S, Lee S B, Park J M, *et al.* Carbon dioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients[J]. *J Chem Tech Biotechnol*, 1997, 69:451 - 455.
- [27] 吴天福, 刘永定, 宋立荣. 蓝藻高 CO₂ 需求突变株的研究进展[J]. *水生生物学报*, 1999, 23:510 - 516.
- [28] References S, Price G, Badger M. Isolation and characterization of high-CO₂ requiring mutants of the cyanobacterium *Synechococcus* PCC7942: Two phenotypes that accumulate inorganic carbon but are apparently unable to generate CO₂ within the carboxysomes[J]. *Plant Physiol*, 1989, 91:514 - 525.
- [29] 宋立荣, 余建维. 蓝藻聚球藻高二氧化碳需求突变株的研究[J]. *水生生物学报*, 1998, 22:330 - 335.
- [30] 张学成, 时艳侠, 孟振. 小球藻紫外线突变及高产菌株筛选[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37:749 - 753.
- [31] 刘广发, 张会永, 楼士林, 等. 耐盐基因转化蓝藻 *Synechococcus sp.* PCC 7942 研究[J]. *海洋科学*, 2002, 26:43 - 46.
- [32] 邱宝胜, 高坤山. 蓝藻浓缩二氧化碳的机制[J]. *植物生理学通讯*, 2001, 37:385 - 392.
- [33] 夏建荣, 高坤山. 绿藻 CO₂ 浓缩机制的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, 13:1507 - 1510.
- [34] 岳丽宏. 光微生物固定烟道 CO₂ 的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2002.
- [35] 程丽华, 张林, 陈欢林. 微藻固定 CO₂ 研究进展[J]. *生物工程学报*, 2005, 21:177 - 181.
- [36] Hirata S, Hayashitani M, Taya M, *et al.* Carbon dioxide fixation in batch culture of *chlorella sp.* using a photobioreactor with a sunlight-collection device[J]. *J Ferment Bioeng*, 1996, 81:470 - 472.
- [37] 徐明芳, 郭宝江. 高效培养螺旋藻封闭式光生物反应器系统的结构单元分析[J]. *食品与发酵工业*, 1998, 24:72 - 79.
- [38] Chae S R, Hwang E J, Shin H S. Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor[J]. *Bioresour Technol*, 2006, 97:322 - 329.
- [39] Israel A, Gavrieli J, Glazer A, *et al.* Utilization of flue gas from a power plant for tank cultivation of the red seaweed *Gracilaria cornea* [J]. *Aquaculture*, 2005, 249:311 - 316.
- [40] Ghirardi M L, Zhang L P, Lee J W, *et al.* Microalgae: A green source of renewable H₂[J]. *Trends Biotechnol*, 2000, 18:506 - 511.
- [41] 缪晓玲, 吴庆余. 利用微藻制备生物质液体燃料[C]. 2003年中国太阳能学会学术年会论文集. 上海: 上海交通大学出版社, 2003:547 - 551.
- [42] Sawayama S, Inoue S, Dote Y, *et al.* CO₂ fixation and oil production through microalga[J]. *Energy Convers Manage*, 1995, 36:729 - 731. ■

您想了解粉体加工技术及相关行业信息吗?

请浏览 中国粉体工业信息网 www.chinapowder.cn

粉碎 分级 纳米颗粒制备 混合 分散 改性 造粒 干燥 烧结 散料输送 储存 粉体检测 粉尘爆炸控制等

010 - 62772725 62772135(Fax)

清华大学材料系逸夫技术科学楼 2713 室