

微生物学报 *Acta Microbiologica Sinica*  
52(11):1378-1384; 4 November 2012  
ISSN 0001-6209; CN 11-1995/Q  
<http://journals.im.ac.cn/actamicrocn>

## 耦合二氧化碳减排的微藻产业化培养技术

张峰<sup>1,2</sup>, 向文洲<sup>1\*</sup>, 萧邛<sup>1</sup>, 陈平原<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

<sup>3</sup>三亚海王海洋生物科技有限公司, 三亚 572000

**摘要:**【目的】建立耦合 CO<sub>2</sub> 减排的微藻培养技术, 在减排 CO<sub>2</sub> 的同时, 有效降低微藻产业化生产的成本。【方法】以两种微藻所具有的 pH 快速漂移与高碱适应特性为原理, 通过 CO<sub>2</sub> 防逸罩简易装备的设计和构建, 建立二氧化碳减排技术。【结果】将该技术应用于微藻培养, 在嗜碱绿球藻 MC-4 的 CO<sub>2</sub> 减排小试培养中, CO<sub>2</sub> 防逸罩的安装使得通入培养物后全部逸出的 CO<sub>2</sub> 被碱性藻液完全吸收, 在海水钝顶螺旋藻新藻株 (HS331) 的工厂化中试培养中, 其平均产率达 9.54 g/(m<sup>2</sup>·d<sup>1</sup>), 碳源成本降低了 57%, 并有效避免了碳酸根离子导致的海水钙镁离子沉淀的产生; 将该技术进一步应用到螺旋藻产业化培养, 在保证获得高质量产品的同时, 其年产量提高了 20%, 每年 NaHCO<sub>3</sub> 用量减少了 66%, 碳源成本减少了 58%, 年减排 CO<sub>2</sub> 量约 45 吨。【结论】本研究实现了 CO<sub>2</sub> 减排技术在螺旋藻产业化培养中的应用, 有效降低了螺旋藻生产成本, 为建立产业化的 CO<sub>2</sub> 减排新技术奠定了重要的理论与技术基础。

**关键词:** 微藻, 钝顶螺旋藻, CO<sub>2</sub> 减排, pH 漂移, 防逸罩

**中图分类号:** Q938      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0001-6209 (2012) 11-1378-07

工业活动导致大气中 CO<sub>2</sub> 含量的极速飙升, 与此同时所带来的温室效应已成为全人类所共同面临并难以有效解决的危机。微藻所具有的独特生理特性为有效吸收 CO<sub>2</sub>、解决温室气体难题提供了契机<sup>[1]</sup>。作为一类具有极高光合效率的单细胞微生物, 微藻不仅能够通过光合作用高效吸收 CO<sub>2</sub>, 而且可将其转化为蛋白质、油脂、多糖等多种生物活性物质成分<sup>[2]</sup>, 由此可望构建具有良好社会效益的新型减排技术<sup>[3]</sup>。

20 世纪 90 年代初以来, 螺旋藻已成为全球范围内产业开发最为成功的微藻<sup>[4]</sup>。螺旋藻所展示

的规模化产业、广泛有效的应用价值<sup>[5-6]</sup> 以及罕有的生理特性为建立 CO<sub>2</sub> 产业化减排技术提供了绝好的发展空间。然而, 由于螺旋藻产业化生产仍采用简易低成本的开放池培养模式, 所通入补充的 CO<sub>2</sub> 气体将会大量逸出和浪费<sup>[7]</sup>, 因此必须建立简易低成本的防逸装置, 才能促进 CO<sub>2</sub> 减排技术的发展。

尽管与淡水养殖螺旋相比, 海水养殖螺旋藻可显著提高其品质<sup>[8]</sup>, 而且能节约大量的淡水资源, 但目前螺旋藻的养殖还是以淡水养殖为主, 主要原因是海水螺旋藻养殖的生产成本高。本实验室自 20 世纪 80 年代末至 90 年代初在国际上率先建立

**基金项目:** 广东省科技计划项目 (2009B080701093); 广东海洋渔业推广专项 (A201101105, A201001104); 海洋公益项目 (201005031-5)

\* 通信作者。Tel: +86-20-89023223; E-mail: xwz@scsio.ac.cn; hncpy2006@sina.com

**作者简介:** 张峰 (1985-), 男, 湖北省潜江市人, 硕士生, 主要从事微藻生物技术研究。E-mail: zhang\_feng1220@163.com

**收稿日期:** 2012-05-16; **修回日期:** 2012-07-10

了全海水的螺旋藻产业化生产技术<sup>[9]</sup>,但由于在培养过程中,高的 pH 生长环境使得无机碳源易与海水中的钙镁离子生成沉淀,大幅度增加了碳源成本,从而限制了其产业化的进一步推广<sup>[10]</sup>。

由于 CO<sub>2</sub> 的碳含量是小苏打 (NaHCO<sub>3</sub>) 的 1.83 倍,而且成本只有小苏打的一半左右,以 CO<sub>2</sub> 取代小苏打做为碳源能很好降低螺旋藻的生产成本。不仅如此,以补充 CO<sub>2</sub> 为碳源能有效的控制藻液的 pH,有效减少海水钙镁沉淀的生成,这无疑也将大幅度降低海水螺旋藻的生产成本。如何通过控制 CO<sub>2</sub> 补充量以避免培养物的快速酸化所导致细胞的损伤,以及如何防止培养物中 CO<sub>2</sub> 的逸出泄露,是目前国际上高度关注并亟需解决的技术关键<sup>[11]</sup>。

本文结合微藻的 pH 漂移原理以及耐高碱的特性<sup>[12]</sup>建立了耦合 CO<sub>2</sub> 减排的开放池培养应用技术,并将该技术初步应用于螺旋藻产业化培养,以解决螺旋藻培养成本过高的问题,为有效降低螺旋藻养殖成本、有力推进微藻低碳产业发展奠定基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 藻种

实验藻种为钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*) 和嗜碱绿球藻 (*Chlorococcum alkaliphilus*, 暂定名) MC-1 株系<sup>[13]</sup>。螺旋藻的全海水中试培养所用藻种为钝顶螺旋藻 HS331 藻株,该藻株为一新藻株,于 2007 年从三亚海王海洋生物科技有限公司(简称三亚海王公司)的海水螺旋藻养殖基地中筛选而得。MC-1 由本实验室于 2002 年从室外蓝藻培养物中分离纯化而得。

### 1.2 培养方法

MC-1 实验室内的培养采用向文洲等的方法进行培养<sup>[13]</sup>。

HS331 海水螺旋藻中试培养采用修改后的南海-II 号培养基<sup>[9]</sup>进行培养,培养基采用 100% 自然海水配置,在 300 m<sup>2</sup> 的跑道池进行,所用海水从试验基地附近海域抽取,通过覆盖颗粒活性炭的砂滤池过滤。跑道池培养中的叶轮搅拌转速为 13 r/min,藻液流速为 0.3 m/s;培养物深度保持在 20 cm 左右。螺旋藻产业化生产采用含 10% - 30% 自然海水的培养基,补充 70% - 90% 的自来水培养,扩种时培养基含 1 - 2 g/L 小苏打,其它培养基成分与 HS331

的一致。

CO<sub>2</sub> 补充方法及减排技术:采用纯度为 99.99% 的食品级瓶装 CO<sub>2</sub>,液态 CO<sub>2</sub> 经减压、气化后通入培养池底,经带微气孔的气石进入培养物。为防止 CO<sub>2</sub> 气体从培养物逸出泄露,在气头上方的培养物液面悬置一方形或长方形玻璃/铁皮箱结构的防逸罩,开口朝下,使补充后外逸的 CO<sub>2</sub> 汇集于气罩中。防逸罩的表面积随单个培养设施的面积不同而不同,水族箱为 1.0 cm<sup>2</sup> - 2.0 cm<sup>2</sup>, 300 m<sup>2</sup> 跑道池为 1.5 m<sup>2</sup>, 2500 m<sup>2</sup> 跑道池为 3.0 m<sup>2</sup>。

### 1.3 生物量及生长速率的测定

户外螺旋藻生物量的测定采用干重法,记录每天的生物量浓度 (g/L),产率按照下列公式计算:

$$Pa [g/(m^2 \cdot d)] = \Delta C \times h \times 10$$

其中  $\Delta C$  表示螺旋藻细胞生物量浓度 (g/L) 的日变化量,  $h$  (cm) 表示藻池中培养液的深度。

MC-1 的生物量的以 700 nm 下的吸光度表示 ( $OD_{700}$ ), 或者以干重表示 (g/L)。

### 1.4 户外螺旋藻的采收与干燥

当螺旋藻培养物光密度  $OD_{700}$  达到 1.2 - 1.5 时,采用 300 目尼龙筛绢过滤采收,清水冲洗至少 3 遍去除无机盐成分。海水中试培养时,将采收藻泥铺开并切成 40 mm × 20 mm × 3.0 mm 大小的小片,晒干,密封保存。螺旋藻产业化生产中采用喷雾干燥。

### 1.5 螺旋藻细胞及其产品的化学分析

总蛋白含量采用凯氏定氮法测定。叶绿素和胡萝卜素测定采用文献 [14] 的方法进行。藻胆色素测定按照文献 [15] 的方法进行。每个样品的测定重复 3 次。重金属元素分子采用等离子光谱法分析,由广州分析测试中心协助完成。镉的参照标准为食品中污染物限量中华人民共和国国家标准 (GB/16740-1997), 砷、铅、汞的参照标准为保健(功能)食品(包括螺旋藻粉)通用中华人民共和国国家标准 (GB/2762-2005)。

### 1.6 碳源成本分析参数

CO<sub>2</sub> 成本分析按 1300 元/吨计。NaHCO<sub>3</sub> 成本按 2300 元/吨计。螺旋藻干品的含碳量按 50% 计算。所用 CO<sub>2</sub> 浓度按 100% 计。广州市海怡康生物科技有限公司(简称广州海怡康公司)提供海水螺旋藻产业化养殖的产量及碳源消耗数据。

### 1.7 MC-1 室内生长以及 pH 漂移的测定

除了将培养基中的 NaHCO<sub>3</sub> 的含量增加到 3g/

L, MC-1 培养基的其他组分同文献 [13]。MC-1 的初始接种量  $OD_{700}$  为 0.2, 培养基 pH 通过 HCl/NaOH 调节到 7.3, 设置 3 个平行样, 藻液置于 500mL 锥形瓶置于光照培养箱中培养 (GXZ-268B), 冷白荧光 (Philips T16 28W/885) 光照, 光强度为  $100 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ , 培养温度为  $25^\circ\text{C}$ , 光照周期为 14:10 (日/夜), 培养一个周期 (7 天), 每天固定时间记录 MC-1 的  $OD_{700}$  以及 pH 值, 做 MC-1 随时间的生长曲线以及 pH 漂移曲线。

### 1.8 MC-1 在不同形态碳源培养下的生物量积累测定

MC-1 的培养在户外 50 L 的水族箱中进行, 培养基同文献 [13], 藻液的初始生物量为  $0.515 \text{ g/L}$ , 起始 pH 8.3, 在随后的培养过程中, 对照组通过加入  $\text{NaHCO}_3$  将藻液 pH 控制在 10.5 以下, 实验组以间断性的通入  $\text{CO}_2$  气体将藻液 pH 值控制在 9.0 - 10.0 之间, 设置 3 组平行, 置于户外自然条件下培养, 记录早、中、晚的光照强度、温度以及藻液的 pH 值, 每天固定时间取 20 mL 藻液测定干重, 做 MC-1 随时间的生物量变化曲线。

## 2 结果

### 2.1 微藻 $\text{CO}_2$ 减排技术的建立与小试验证

室内 MC-1 培养实验结果表明, 当 MC-1 以  $\text{NaHCO}_3$  为碳源进行光照培养时, 培养液的 pH 值在一个培养周期内从起始 7.3 逐渐上升到了 12.0 左右 (图 1), 即 pH 漂移现象。MC-1 在较高 pH 水平下 (9.0 - 11.0) 的生长状态良好。在室外小试实验中, 以间断性通入  $\text{CO}_2$  的方式补充碳源能将藻液的

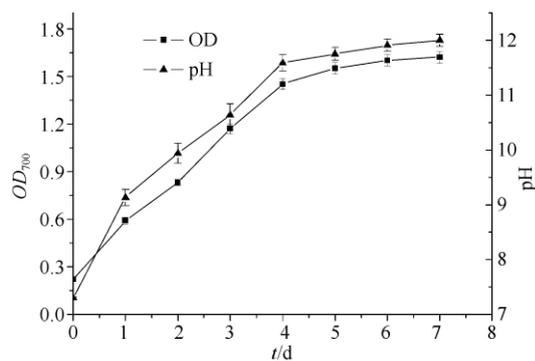


图 1 实验室内 MC-1 生长曲线以及 pH 漂移

Fig. 1 The growth curve and the pH drift of MC-1 in laboratory.

pH 控制在 9.0 - 10.0 之间, 而仅补充  $\text{NaHCO}_3$  的对照组, 其培养液的 pH 只能控制在较高范围 (10.2 - 10.5)。在以  $\text{NaHCO}_3$  为碳源的对照组的培养末期, 培养物底部有钙镁沉淀生成, 而以  $\text{CO}_2$  为碳源的实验组则无沉淀产生。经过 11 天的连续培养,  $\text{CO}_2$  实验组和  $\text{NaHCO}_3$  对照组藻液的生物量浓度从起始  $0.515 \text{ g/L}$  分别上升到  $1.224 \pm 0.030 \text{ g/L}$  和  $0.896 \pm 0.035 \text{ g/L}$ ,  $\text{CO}_2$  实验组累计生物量产量高出  $\text{NaHCO}_3$  对照组 86.08% (图 2)。

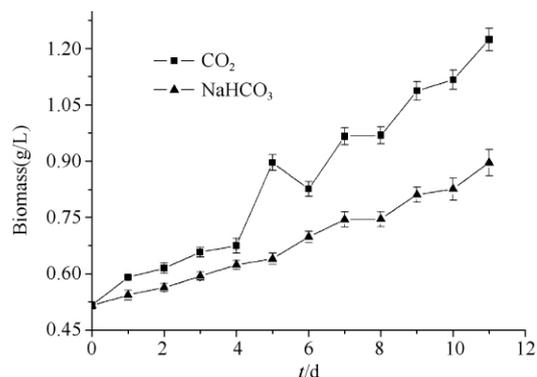


图 2 50 L 水族箱中不同形态碳源培养条件下的 MC-1 生物量积累

Fig. 2 The biomass accumulation of MC-1 with different form of carbon source in 50 L aquarium.

在  $\text{CO}_2$  通入的初始阶段, 已排除空气的防逸罩内所汇集的气体全部是  $\text{CO}_2$  气体, 在培养液的 pH 得以有效控制后, 停止通入  $\text{CO}_2$  气体。继续培养较长时间 (约 2 h) 后吸取防逸罩内的残余气体, 经成分分析表明, 罩内气体仅存在  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ 。由培养物光合作用释放的氧气含量大约是氮气含量的 2 倍以及防逸罩内残余的  $\text{CO}_2$  气体组分为 0 的分析结果表明, 罩内汇集的  $\text{CO}_2$  已被培养物完全吸收 (图 3)。

### 2.2 二氧化碳减排技术应用海水螺旋藻新藻种的中试放大培养

在 300 平米的开放跑道池中将前文中建立的  $\text{CO}_2$  减排技术应用于海水钝顶螺旋藻 HS331 株系的中试培养, 经过 60 天连续培养共生产了 173.97 kg 的干藻, 平均产率达到  $9.54 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ , 单日最高产率达到  $37.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$ 。每生产 1.0 kg 螺旋藻干品比传统海水螺旋藻生产技术节约了 5.2 kg 的  $\text{NaHCO}_3$ , 同时也消耗了 0.76 kg 的  $\text{CO}_2$ , 每公斤干藻的碳源成本减少了 57% 以上 (表 1)。研究结果还

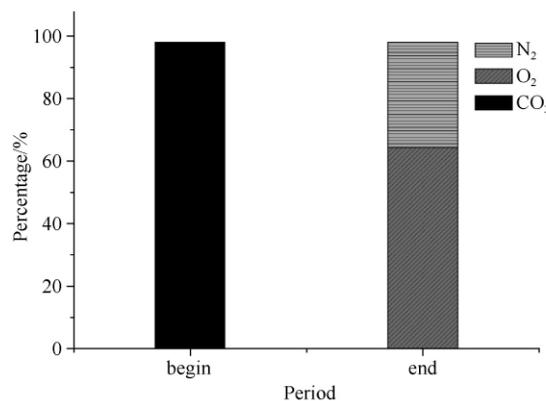


图3 不同时期下二氧化碳防逸罩内气体组分的变化

Fig.3 The change of gas composition in the CO<sub>2</sub> leakage prevention covering-box during different period.

表明,以耦合 CO<sub>2</sub> 的方式进行生产可完全避免海水培养物形成钙镁沉淀。

表1 海水螺旋藻 HS331 株系的传统生产与耦合 CO<sub>2</sub> 减排中试生产的碳源消耗比较

Table 1 The carbon consumption in CO<sub>2</sub> sequestration coupled with the pilot-scale production of seawater *Spirulina* HS331 strain compared with the traditional seawater production technology

	Traditional production*	Production coupled with CO <sub>2</sub> sequestration
Carbon source	NaHCO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub>
Consumption of carbon source per kilogram of dry production (kg)	8.30	3.10 0.76
Cost of carbon source per kilogram of dry production (yuan)	19.09	8.12
Relative cost of carbon source	100.00	42.52

\* Average value between 2008 and 2010 from the Guangzhou Haiyikang Biotechnology Co., Ltd

### 2.3 CO<sub>2</sub> 减排技术应用与螺旋藻产业化生产

表2所示,在三亚海王公司螺旋藻产业化生产中,耦合 CO<sub>2</sub> 生产工艺的年产量比传统工艺提高了20%;每生产一吨藻粉节约 NaHCO<sub>3</sub> 4.16 吨,但需额外补充 CO<sub>2</sub> 1.07 吨,总碳源成本降低了58%以上;传统生产工艺不能有效的控制培养液 pH,最高值可达11.5。新生产工艺能将藻液的 pH 控制在10.0-10.3 的范围,年消耗 CO<sub>2</sub> 约45 吨。

耦合 CO<sub>2</sub> 减排技术得到的螺旋藻产品的主要成分分析结果表明,螺旋藻的主要营养成分含量保持较高水平,重金属含量远低于国家限量标准(表3)。

表2 耦合 CO<sub>2</sub> 减排的螺旋藻产业化生产与传统技术的主要生产参数比较

Table 2 The main production data on CO<sub>2</sub> sequestration coupled with large scale production of *Spirulina* compared with the traditional technology

	Traditional production*	Production coupled with CO <sub>2</sub> sequestration
The range of pH change	Approach to 11.5	10.0 - 10.3
Production time (year)	1	1
Output per year (ton)	35.0	42.0
Productivity [g/(m <sup>2</sup> ·d <sup>1</sup> )]	4.36	5.23
Carbon source	NaHCO <sub>3</sub>	NaHCO <sub>3</sub> + CO <sub>2</sub>
Consumption of carbon source per ton of dry production (ton)	6.30	2.14 1.07
Cost of carbon source per kilogram of dry production (yuan)	14.49	5.99
Relative cost of carbon source	100.00	41.35

\* Average value between 2008 and 2010 from the Guangzhou Haiyikang Biotechnology Co., Ltd

表3 螺旋藻主要营养成分以及重金属的含量

Table 3 The main nutritional composition and heavy metal content of *Spirulina*

Nutritional composition	Content (%)	Heavy metal	Content (ppm)	National standard (ppm)
Proteins	62.00 ± 1.37	Pb	0.10	2.0 <sup>a</sup>
Phycocyanin	8.90 ± 0.34	As	0.18	1.0 <sup>a</sup>
Chlorophyll	0.79 ± 0.02	Hg	0.016	0.3 <sup>a</sup>
Carotenoid	0.40 ± 0.02	Cd	0.037	(0.1 - 0.5) <sup>b</sup>

a: GB/16740-1997; b: GB/2762-2005.

## 3 讨论

### 3.1 本研究的减排原理与适宜减排的藻种

在利用微藻减排 CO<sub>2</sub> 的过程中,过多的吸收 CO<sub>2</sub> 可使培养物快速酸化,从而对藻细胞产生毒害作用,并导致溶液中的碳源以 CO<sub>2</sub> 的形式流失。根据酸碱平衡原理,CO<sub>2</sub> 更易被碱性溶液所吸收,藻液的碱度越高,其对 CO<sub>2</sub> 的吸收效率越高,培养物的酸化速度越慢<sup>[16]</sup>。

一些微藻在生长过程中具有 pH 漂移的特性,其培养液的 pH 可随着藻的生长持续升高,这是由于这些微藻在利用碳酸氢根离子同时使得溶液中 OH<sup>-</sup> 离子含量增加<sup>[17]</sup>。pH 漂移所形成的高碱性培养液可以有效的吸收 CO<sub>2</sub>,而且通过控制培养液中 CO<sub>2</sub> 的补充量可有效维持培养液 pH 的稳定,从而避

免培养液的过度酸化。赖文亮等<sup>[18]</sup>利用这一原理建立螺旋藻的 CO<sub>2</sub> 补充技术,使藻液的 pH 保持在 8.5 - 9.7 范围内,单位面积产率可达 9.1 g DW / (m<sup>2</sup> · d<sup>1</sup>)。因此具有耐高碱和 pH 漂移特性的藻种在 CO<sub>2</sub> 减排中将独具优势。本实验室通过对硅藻 MD-1 的研究也论证了藻种的高碱、高 pH 适应性以及 pH 漂移特性对 CO<sub>2</sub> 减排的重要生理作用<sup>[19]</sup>。

本实验室早先分离的 MC-1 藻种是目前文献所记载 pH 漂移最快、适应碱性极强的微藻(图 1)<sup>[13]</sup>。因此,利用 MC-1 这一典型特性,建立了室外小体积的 CO<sub>2</sub> 补充(减排)技术(图 2),并构建了简易有效的 CO<sub>2</sub> 防泄露装置,可使藻液中逸出的 CO<sub>2</sub> 能被碱性培养物完全吸收(图 3)。由于螺旋藻和 MC-1 在生理特性的高度相似性,即它们在 CO<sub>2</sub> 减排原理上的一致性,本研究成功将该技术应用于螺旋藻的中试培养和产业化生产。

### 3.2 耦合 CO<sub>2</sub> 减排技术对螺旋藻产业推广的意义

在没有建立 CO<sub>2</sub> 补充装置以前,三亚海王公司的螺旋藻生产因藻液的 pH 漂移过高导致不能长时间持续生产,平均每 4 个月需重新扩种一次,造成了肥料的大量浪费。采用本研究的 CO<sub>2</sub> 补充技术以后,不仅有效的替代了 NaHCO<sub>3</sub> 碳源,而且使藻液 pH 得以较好地控制,培养基可以全年循环使用,碳源成本大幅度降低,螺旋藻产量也得以明显提高(表 2)。更为重要的是,采用该技术可获得优质的螺旋藻藻粉,其主要营养成分含量均保持在较高水平(表 3)<sup>[9, 20]</sup>。同时,螺旋藻的铅、砷、汞元素含量也非常低,远低于国家保健(功能)食品重金属元素的限量标准(表 3),镉元素含量也低于大量食用的普通食品的标准,这 4 种元素还低于该公司在建立 CO<sub>2</sub> 补充技术以前合格产品的重金属元素含量(结果未给出)。因此本研究结果表明,以 CO<sub>2</sub> 取代 NaHCO<sub>3</sub> 可能有效地减少了螺旋藻对重金属的富集。近来,螺旋藻等食品的重金属含量及标准问题得到了社会上的高度关注和广泛争议,因此本研究建立耦合 CO<sub>2</sub> 减排的优质、高产、低成本的培养技术,对更好地发展螺旋藻产业具有重要意义。

### 3.3 微藻 CO<sub>2</sub> 减排技术进一步优化与产业化应用前景

尽管本研究通过耦合 CO<sub>2</sub> 补充技术节省了螺旋

藻产业化生产中 58% 以上的碳源成本,但与理论值相比,还有较大差距。按干藻粉 50% 的碳含量估算,每千克干藻粉的碳源(CO<sub>2</sub>)理论生产成本为 1.47 元,可本研究的实际生产成本为 5.99 元(表 2)。可见,该技术还有更大的优化空间。本研究产业化应用效果与理论上的差距主要来自两个方面:一方面,扩种阶段仍然以 NaHCO<sub>3</sub> 为主要碳源。另一方面,由于藻池的培养面积大(2500m<sup>2</sup>),目前所设计的 CO<sub>2</sub> 补充装置较小,在产业化培养过程中只能将藻液的 pH 控制在 10.0 - 10.3 左右。与此相对应的是,海水螺旋藻 HS311 株系的中试培养因 pH 控制在 9.3 - 9.7 之间,所获得的产率比产业化生产高出近一倍(表 2)。由于中试实验在实施期间,正值雨水台风多发期,能够获得这样的产量表明了 HS311 为一株优良的海水藻种。将 pH 控制在更低的水平将会进一步的节省成本,或更有利于生长,但过低的 pH 会导致 CO<sub>2</sub> 泄露并失去对敌害生物的控制<sup>[13]</sup>。因此,我们认为在耦合 CO<sub>2</sub> 减排的螺旋藻产业化培养中,pH 应控制在 9.0 - 9.5 范围为宜。如何通过改善 CO<sub>2</sub> 补充装置、优化扩种阶段的 NaHCO<sub>3</sub> 用量,从而更好地减少碳源用量或碳源成本,还有待进一步深入研究。

除了高附加值产品,微藻还具有生物质能源、食品和饲料等低值大宗产品的开发潜力。因此本研究显示,一方面,通过耦合 CO<sub>2</sub> 减排大幅度降低了微藻的生产成本,且有更大的降低成本的空间。另一方面,本项研究表明,耦合 CO<sub>2</sub> 减排可有效避免全海水培养中的大量海水钙镁沉淀的产生,因此,在淡水和耕地资源日益紧张背景下,充分利用滩涂、盐碱地和取之不尽的海水,采用类似本研究独特生理特性的微藻和更为优化的减排技术,进行超大规模的微藻产业开发是可能实现的,进而对食品、饲料甚至能源行业或将产生重大影响。甚至可以假设和期待,在不久的将来,微藻可望成为能同时解决全球能源和碳排放问题的终极出路<sup>[3]</sup>。

## 参考文献

- [1] Usui N, Ikenouchi M. The biological CO<sub>2</sub> fixation and utilization project by RITE (1) - Highly-effective photobioreactor system. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38: 487-492.

- [2] Skjånes K, Lindblad P, Muller J. BioCO<sub>2</sub>- a multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO<sub>2</sub> while producing H<sub>2</sub> and high value products. *Biomolecular Engineering*, 2007, 24: 405-413.
- [3] Packer M. Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. *Energy Policy*, 2009, 37: 3428-3437.
- [4] Li DM, Qi YZ. *Spirulina* industry in China: Present status and future prospects. *Applied Phycology*, 1997, 9: 25-28.
- [5] Belay A, Ota Y, Miyakawa K, Shimamatsu H. Current knowledge on potential health benefits of *Spirulina*. *Applied Phycology*, 1993, 5: 235-241.
- [6] 何晓艳, 向文洲, 何慧, 林坚士, 董俊德. 海水钝顶螺旋藻富硒及其含硒藻蓝蛋白的研究. 热带海洋学报 (*Journal of Tropical Oceanography*), 2005, 24 (4): 30-34.
- [7] 李夜光, 胡鸿钧, 龚小敏. 螺旋藻培养液 pH 值变化的机理和碳源利用率的研究. 生物工程学报 (*Chinese Journal of Biotechnology*), 1996, 12: 242-248.
- [8] Wu BT, Xiang WZ, Teng CK. Cultivation of *Spirulina* in China. *Oceanology and Limnology*, 1998, 16: 152-157.
- [9] Wu BT, Teng CK, Xiang WZ. Large-scale cultivation of *Spirulina* in seawater based culture medium. *Botanica Marina*, 1993, 36: 99-102.
- [10] Materassi R, Tredici M, Balloni W. *Spirulina* culture in sea-water. *Applied Microbiology Biotechnology*, 1984, 19 (6): 384-386.
- [11] 徐少琨, 张峰, 向文洲, 吴园涛, 任小波. 微藻应用于煤炭烟气减排的研究进展. 地球科学进展 (*Advance in Earth Science*), 2011, 26 (9): 944-953.
- [12] Maberly SC, Spence DHN. Photosynthetic inorganic carbon use by freshwater plants. *Ecology*, 1983, 71: 705-724.
- [13] 向文洲, 谢科, 吴华莲, 何慧, 肖伟. 一种绿藻分离物的显微研究. 热带海洋学报 (*Journal of Tropical Oceanography*), 2007, 26: 65-68.
- [14] Kraay GW, Zapata M, Veldhuis MJW. Separation of chlorophylls c1, c2 and c3 of marine phytoplankton by reversed-phase-C18-high-performance liquid chromatography. *Phycology*, 1992, 28: 708-712.
- [15] Bennett A, Bogorad L. Properties of subunits and aggregates of blue-green algae biliproteins. *Biochemistry*, 1971, 10: 3625-3634.
- [16] Ju-No L, Jin-Suk L, Chul-Seung S, Soon-Chul P, Seung-Wook K. Methods to enhance tolerances of *Chlorella KR-1* to toxic compounds in flue gas. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2000, 84-86: 329-342.
- [17] Chi ZY, Fallon JV, Chen SL. Bicarbonate produced from carbon capture for algae culture. *Trends in Biotechnology*, 2011, 29 (11): 537-541.
- [18] Lai WL, Lee CG, Su HM. A case study of CO<sub>2</sub> fixation from the flue gas by microalgae on talin coal-fired thermal power plant. *Monthly Journal of Taipower's Engineering*, 1998, 729: 1-13.
- [19] Xiang WZ, Su JJ, Liu JH. Isolation of an extremophilic diatom strain and its potential in biotechnology. // Ni W, Xu J. Proceedings of the Conference on China Technological Development of Renewable Energy Source. 1. Beijing, Scientific Research Publishing (USA), 2010.
- [20] 吴伯堂, 林坚士, 向文洲, 曾呈奎. 热带地区钝顶螺旋藻的大量培养. 海洋湖沼通报 (*Transactions of Oceanology and Limnology*), 1992, 23 (6): 663-668.

# CO<sub>2</sub> sequestration coupled with industrial cultivation of microalgae

Feng Zhang<sup>1,2</sup>, Wenzhou Xiang<sup>1\*</sup>, Bei Xiao<sup>1</sup>, Pingyuan Chen<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

<sup>2</sup> Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> Sanya Neptunus Marine Biological Technology Co., Ltd, Sanya 572000, China

**Abstract:** [Objective] In order to reduce CO<sub>2</sub> emission and lower the cost of microalgal industrial production at the same time, a technology was developed to combine CO<sub>2</sub> sequestration with microalgal cultivation. [Methods] The technology was based on rapid pH drift and high pH adaptability of two microalgal species, *Chlorococcum alkaliphilus* MC-4 and *Spirulina platensis*. A simple structure, CO<sub>2</sub> leakage prevention covering-box, was designed to collect CO<sub>2</sub> escaped from culture medium when CO<sub>2</sub> gas was injected into the culture. [Results] In the small-scale outdoor cultivation of MC-4, CO<sub>2</sub> escaped from culture was all absorbed by culture with the help of covering-box. Results from the pilot-scale cultivation of *S. platensis* (HS 331) combined with the CO<sub>2</sub> addition technology show that the cost of carbon source was remarkably reduced and deposition of CaCO<sub>3</sub> and MgCO<sub>3</sub> was effectively avoided. In addition, the average productivity was rather high [9.54g/(m<sup>2</sup>·d<sup>1</sup>)]. In the large-scale cultivation of *S. platensis*, the annual yield was increased by 20% and high quality product was obtained with the CO<sub>2</sub> addition technology. In addition, 66% of NaHCO<sub>3</sub> was saved, more than 58% of carbon cost was reduced, and about 45 tons of CO<sub>2</sub> was sequestered. [Conclusion] The technology was successfully applied in industrial production of *S. platensis* and the cost of producing *S. platensis* was dramatically reduced. The study would provide new insight into carbon dioxide sequestration.

**Keywords:** Microalgae, *Spirulina platensis*, CO<sub>2</sub> sequestration, pH drift, leakage prevention covering-box

(本文责编:张晓丽)

Supported by the Major Project of Chinese National Programs for Fundamental Research and Development (2010CB126500)

\* Corresponding author. Tel: +86-27-87281685; Fax: +86-27-87280670; E-mail: youguoli@mail.hzau.edu.cn

Received: 27 April 2010/Revised: 19 June 2010

## 《微生物学报》审稿程序

问:贵刊的审稿程序是怎样的?一般多长时间可以知道稿件是否被录用?

答:本刊严格遵守“三审制”,即:编辑部内审,专家外审,主编总审。从投稿日期开始,争取在2个月之内给出审稿结果,3-6个月之内发表。

- (1) 收到来稿后,首先要由编辑初审,通过后再送外审。将请2位专家进行审阅,再送主编进行最后的总审,这个过程一般不会超过2个月。如果初审2位专家的意见分歧较大,编辑部将再请第3位专家进行初审,之后再送主编总审,那么此稿的审理时间可能会超过2个月。
- (2) 完成审稿后(即主编给出总审意见),编辑会给作者发出E-mail告知修改意见(包括学术上的和写作格式上的)。作者在返回修改稿后,经本刊审核合格后方可被录用。

在此提醒作者,在没有完成全部审稿之前,不要在远程系统中看到初审意见时就急于返回修改稿件。