

文章编号: 1004-0374(2010)05-0492-07

管道式光生物反应器的设计和性能

刘小澄¹, 刘永平^{2*}

(1 暨南大学医学院, 广州 510632; 2 广州南沙资产经营有限公司, 广州 511457)

摘要: 该文概述了管道式光生物反应器在设计上对性能的要求, 对影响光生物反应器培养效率的各种生长条件如光能利用效率、CO₂ 利用效率、环境温度、溶解氧等问题进行了探讨, 指出高效并可自动调节的藻液循环混合系统对于高密度海藻培养是非常重要的, 提出了能否自动清洗光生物反应器内壁是判断光生物反应器是否可用于工业化生产的关键。

关键词: 海藻; 光生物反应器; 生物工程技术; 生物柴油

中图分类号: Q949.21; TE667 **文献标识码:** A

Tubular photobioreactor design and performance

LIU Xiao-cheng¹, LIU Yong-ping^{2*}

(1 Medical College of Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2 Guangzhou Nansha Assets Operation Co., Ltd., Guangzhou 511457, China)

Abstract: This article reviewed the performance requirements of tubular photobioreactor design, discussed various growth conditions that affect the cultural efficiency of photobioreactor, including efficiency of solar energy utilization, efficiency of CO₂ utilization, environmental temperature, and dissolved oxygen, indicated that the efficient and self-adjustable algae liquid cycle hybrid system is very important in high-density algal culture, and suggested that the ability of self-cleaning in photobioreactor wall is the key to determine whether the photobioreactor can be used for industrial production.

Key words: algae; photobioreactor; biotechnology; biodiesel

用海藻生产生物柴油, 产量可超过传统的油料作物 30 倍以上^[1]。海藻的优势在于生长极为迅速, 24 h 内生物质普遍可增加 1 倍, 3.5 h 就可以达到对数生长期^[2]。利用海藻生产生物柴油的研究虽尚处于小规模生产试验阶段, 但已证实了利用藻类能生产出足够的生物柴油, 这可能是替代目前使用的石化柴油唯一可行的方法^[3]。因此, 利用工业化生产海藻的装置, 获得大规模生产生物柴油所需要的海藻原料, 是各国科学家公认解决能源替代的重要方案^[4]。

近年来, 培养海藻的光生物反应器在应用和控制技术上有越来越多的突破, 尽管由于全球经济危机造成石油价格下跌, 企业家们仍热衷于投资海藻生物柴油的研发。2006 年全球研发海藻生物燃料的企业仅有 4 家, 到 2008 年已超过 50 家^[5]。可以预

见, 采用工业装置大规模生产海藻并制造海藻生物柴油的技术近几年内将取得重大突破, 海藻生物柴油产业将成为一个新兴的替代能源产业^[6]。

1 海藻生产系统

光生物反应器已成为高效、快速、大量培养海藻的关键设备, 在工业级实验室使用的各种封闭式反应器已证明比开放式反应器具有更好的培养和控制条件。封闭式反应器培养海藻可以使藻细胞的密度提高 6~12 倍, 总体积相对减少, 分离成本大大降低, 各种生长参数及工艺可以采用自动化、集约化控制和管理, 提高了生产效率和产品质量, 可避免

收稿日期: 2009-11-03; 修回日期: 2010-01-04

*通讯作者: E-mail: gzhdlyp@21cn.com

受其他生物和非生物物质的污染^[7]。预计以封闭式光生物反应器组成的生态生命支持系统的发展将为海藻生物培养技术的发展铺平道路^[8]。

设计光生物反应器除能够有效扩大系统的规模外, 还应满足对影响海藻生长多种变量参数的控制要求, 如 CO_2 在藻液中的扩散和海藻的吸收、藻液中溶解氧的交换和去除、光能的利用和光抑制的预防、藻液的循环与混合, 以及温度、pH 值和培养液营养的控制, 以确保这些变量都保持在可接受的水平^[9]。许多不同类型的反应器系统都能够满足这些基本要求, 而这些系统却不能用于大规模的海藻培养^[10]。许多实验室规模的反应器很容易得到培养海藻满意的研究结果, 但是其中只有少数能够成功扩大到中试^[11]。

管道式光生物反应器可以用玻璃或塑料管建造成水平式、水平多层式、垂直式、圆锥形和倾斜式等结构, 与泵组合可以构成最适合培养海藻的循环系统^[11]。它具有占地面积小和高表面体积比, 可以提高培养海藻的光合作用, 被认为是最适合户外大规模培养海藻、最有潜力的反应器^[12]。

2 光生物反应器内壁清洗

要优先重视海藻附着在光生物反应器内壁生长的问题。附着在反应器内壁的海藻会优先生长, 从而减少了管道的光渗透, 随着附壁海藻密度增加, 光线穿透能力随之减低, 如不定期清洗和去除会逐步影响反应器的透光性, 使海藻光合作用降低, 附壁情况严重时, 会极大地降低反应器的生产效率^[2, 11]。

控制海藻附壁生长和清洗内壁的办法通常有:

(1) 使用大量的惰气间歇冲刷管道内表面; (2) 通过与管道紧密接触的清洗球, 在管道内持续循环运动清洁管道内表面; (3) 提高藻液的湍流流速; (4) 用悬浮在藻液中的沙子或砂砾颗粒磨去黏附在管道内壁表面的生物质。潜在的技术是利用酶消化黏附在管壁上的藻细胞和聚合物, 控制海藻在管壁上生长^[2]。

一个工业化的光生物反应器系统, 能够长期运行是最基本的功能。采用自动清洗内壁装置清洁管道内表面, 是设计工业系统必须解决的问题。倾斜式管道反应器(图1)或垂直式的反应器(图2), 多数采用的是气升式原理, 利用气体进入反应器导流筒或导流板后, 造成管内流体的密度差, 在静压差和进入气体的作用下, 使液体在光生物反应器内形成

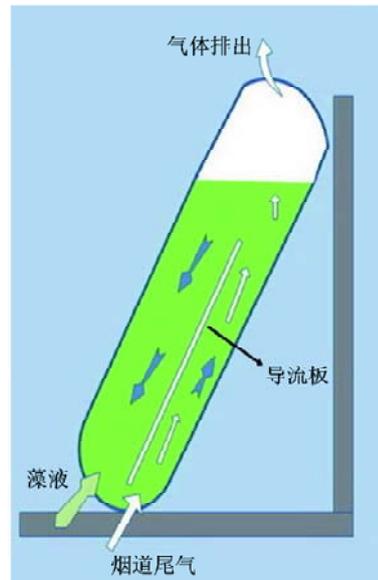


图1 倾斜式反应器原理示意图

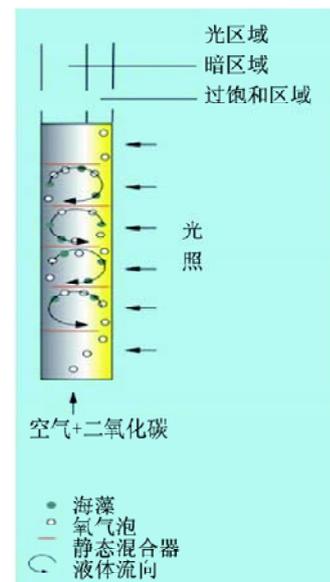


图2 垂直式反应器原理示意图

循环流动。由于管内存在导流筒或导流板, 反应器内无法安装自动清洗部件。

利用管道式反应器外部的液泵, 使反应器内藻液产生循环, 由于内部没有阻碍部件, 可以利用清洗部件对反应器内壁定期清洗。清洗部件有多种样式, 基本原理都是利用清洗部件两端藻液产生的压差使清洗部件在管内运动, 从而达到清洗管道内壁的效果。AlgaeLink公司反应器所用的清洗头结构简单(图3), 管壁清洗效果好, 故障率低, 可以进行



图3 AlgaeLink公司反应器清洗头

自动控制，目前尚无其他更好的取代方案。

3 光生物反应器光能效率

光照在海藻生长和代谢中有非常重要的作用，是其生长的主要能量来源^[13]。在一定的pH、温度和营养条件下，光照的强弱和时间长短决定着海藻光合作用的效率，对海藻的生长速率起着至关重要的作用^[14]。

光生物反应器单位容积受光量与海藻培养效率密切相关：一方面，光线强度过高或海藻细胞浓度过低，将产生光抑制现象，导致光能不能被充分利用；另一方面，光线强度过弱或海藻细胞浓度过高，将造成光限制现象，此时海藻细胞生长所需的光能得不到适时的满足。这两种情况都制约着培养效率的提高和细胞增长潜能的发挥^[15]。试验证实，藻类对光照强度有一个饱和范围，即饱和光照强度。在这个强度内，随着光强的增加，藻类的生长速率加快，超过这个强度，藻类的光合速率反而减弱或停止，藻类生长受到了抑制^[14]。

光生物反应器建在户外，培养海藻过程中所需要的光能来自太阳光，阳光直接照射到反应器的藻液表面上，由于藻体之间存在相互遮挡的作用，入射光在穿透藻液的过程中存在着不断衰减的现象，反应器表面的光照强度最大，距反应器的表面越远，藻体所能接受到的光照强度就越弱，并且培养密度越高液层越厚这种光衰减现象就越严重^[16]。

对螺旋藻培养液光衰减规律研究表明：在藻液的浓度为定值，其他条件恒定时，在不同的入射光强度(I_0)下，藻液的吸光度 $\ln(I_0/I)$ 随着藻液细胞悬液深度的增加而成比例地增加，吸光度 $\ln(I_0/I)$ 值的大小仅与藻细胞悬液的深度(h)有直接的关系，而与入射光的光强无关(图4)。同一藻体密度下，培养液深度的增加对光的吸收增大，从而使入射光透过藻液的比例下降，即透过光强度(I)随培养液深度的增加而减小，光衰减的趋势由快逐渐变慢，直至趋

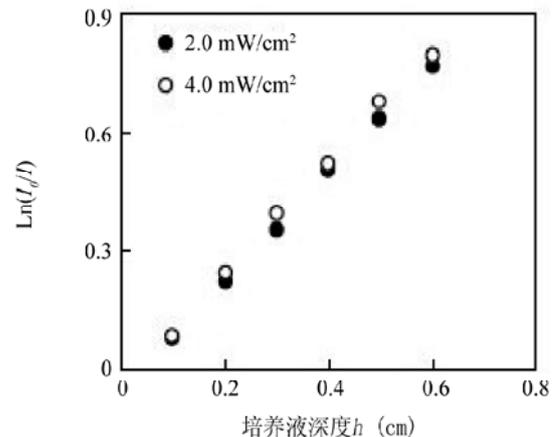


图4 螺旋藻培养液深度对穿透光的影响

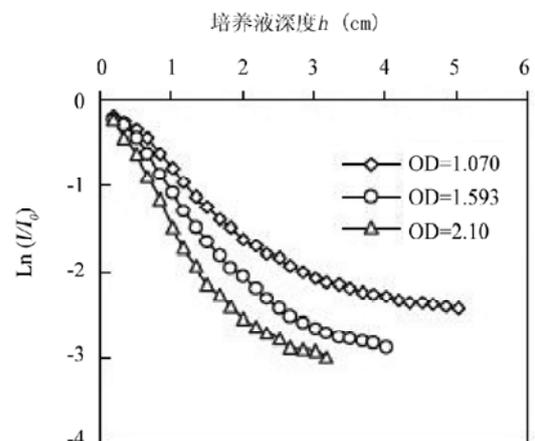


图5 螺旋藻培养液的光衰减曲线

于平缓(图5)^[17]。

在培养海藻的过程中，由于光衰减现象的存在，使反应器内部接受到的光照呈现逐渐减弱的趋势，藻细胞的生长就会出现光能限制^[18]。由于海藻细胞对光能的吸收率与光合作用率成正比，在线性增长阶段，细胞浓度相当高，随着光生物反应器深度加深，所提供的光能几乎都由生长的细胞吸收。因此，作为衡量反应器每单位容积总光能量的平均光密度，是比较反应器性能的一个很好的标准^[19]。

4 光生物反应器 CO₂ 利用效率

藻类生物质含有 40%~50% 的碳, 所有的碳都是来自于 CO₂^[20], 这表明生产 1 kg 的海藻干物质需要 1.5~2.0 kg 的 CO₂^[21]。管道式反应器利用 CO₂ 的方式主要有三种: (1) 反应器和藻液泡沫反应器组成循环系统, 烟道尾气中的 CO₂ 在泡沫反应器内被吸收形成饱和溶液^[22]; (2) 含有 CO₂ 的烟道尾气直接注入反应器, 利用气升原理使藻液携带气泡在反应器内形成循环流动的过程中吸收 CO₂^[23]; (3) 反应器和液泵组成循环系统, 纯 CO₂ 气体伴随藻液输入反应器管道内并形成微小气泡, 在藻液流动过程中与海藻充分混合实现气体交换^[24]。

海藻干物质含油量在 30%~40% 时, 藻液中海藻密度每增加 1 g/L (干物质), 需要从藻液中获得 2~2.8 g/L 的 CO₂^[22-25]。要提高反应器生产海藻的产量, 也就需要更多的 CO₂。利用工业锅炉烟道尾气为海藻提供碳源被是一种有希望的、经济高效的新方法^[26], 国外在反应器中利用锅炉烟道尾气培养海藻的研究获得了较好的效果^[27, 28]。

5 光生物反应器温度控制

季节和昼夜变化造成的温度波动是影响户外光生物反应器最重要的环境因素。对 34 种不同的绿藻和蓝藻物种对温度反应影响的研究发现, 大多数海藻生长最佳温度响应曲线有一个稳定和较宽的温度范围, 超出这个温度范围之外, 海藻生长率会突然下降^[29]。温度对小球藻生长影响如图 6 所示: 小球藻浓度在 5~30 °C 温度范围内, 均有不同程度的增长。温度在 5~15 °C 和 30~35 °C 区间内, 小球藻繁殖增长量较小, 表明在这两个温度区间内, 小球藻的生长受到抑制, 繁殖速度受到影响; 温度在 15~25 °C 区间内, 小球藻繁殖增长量的增长速度较

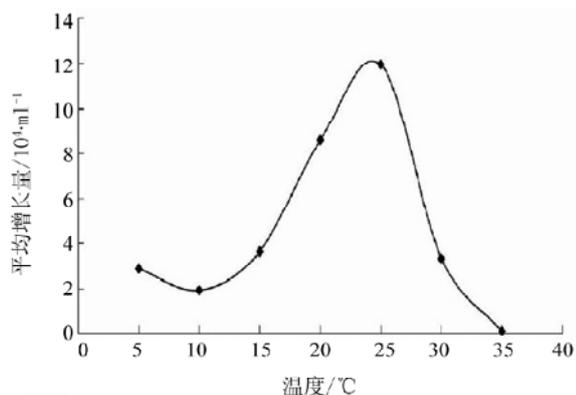


图6 温度对小球藻生长对影响

快, 说明此段温度比较适合小球藻生长^[30]。

反应器培养系统的温度变化会对海藻细胞生长或整体的生产效率产生重大影响, 因为海藻光合作用和呼吸作用基本上是细胞酶反应的过程, 生物活性受温度影响很大^[31, 32]。

在夏季, 户外封闭的反应器处于 35 °C 以上的高温环境可能长达几个小时, 反应器系统如建在室内, 温室大棚产生的温室效应会进一步升高系统的环境温度, 用冷水喷洒到反应器表面进行热交换, 已被证明是保持适合海藻最佳生长温度的有效办法, 但是会增大建造反应器系统的成本和生产成本^[33]。

6 光生物反应器管道内径

增加水平式管道光生物反应器的层数, 使单位面积内反应器容积和受光面积分别达到最大, 是人们常会考虑到的设计方案。如德国 Astaxa 公司采用水平式多层管道反应器进行海藻培养研究 (图 7); 以色列 Algatech 公司在阿拉瓦沙漠建造了管道总长度为 150 km 水平式多层反应器进行试验 (图 8); 德国 BBI 公司建造了有效容积为 700 m³, 管道总长度为 500 km 的水平式多层反应器进行研究试验 (图 9)。此外, 美国的 Jacobs 大学和德国 Salata 等多个公司也都研究过类似的多层管道反应器。

为增大藻液单位容积的光合作用效率, 就需要增加反应器受光表面积, 水平式多层管道式反应器的管道内径通常设计的较小。这种设计存在的问题是: (1) 要增加单位面积内的反应器有效容积, 只能采用增加管道层数和减小相邻管道间距的办法来解决。由于管道长、内径小, 在培养海藻的过程中, 对管道内藻液的 pH 值、CO₂ 和 O₂ 等海藻生长参数进行调节和控制困难, 培养海藻的生产效率不高。(2) 在小内径管道中的海藻细胞浓度较低时, 在强光照射下容易产生光抑制现象。(3) 海藻正常生长温度在 20~35 °C, 在极端高温或低温的情况下海藻脂质细胞的合成量会减小^[34]。反应器管道内径过小, 在室外高温的情况下反应器中藻液的热容量小, 需要消耗更多的水用于对反应器降温, 增加了能耗^[35]。(4) 上下层管道和相邻管道相互之间为避免“自我阴影”现象, 要有足够的间距。管道层数过多、过高, 不利于生产维护, 反应器占用面积大。(5) 由于反应器管道较密集, 对管道外壁进行自动清洗困难, 需要建大棚防止灰尘, 增大了投资。(6) 管道内径小, 管道长且弯头多, 采用自动清洗部件清洗管道内壁, 在技术上存在困难。



图7 Astaxa公司的反应器



图8 Algattech公司的反应器



图9 BBI公司的反应器

目前, 全球采用封闭式反应器的生物燃料公司^[5]均没有采用小内径多层管道结构的反应器作为生产海藻的装置。

增大反应器管道内径可以提高反应器的热容量, 降低高温影响和光抑制, 通过控制藻液的循环流动速度可以提高反应器管道周围的明区和中央暗

区藻液的混合度, 提高光能利用效率, 在用地面积相同的情况下, 可提高藻液体积增加海藻产量, 考虑到未来技术的发展, 用管道式反应器培养海藻的效率会大幅度提高, 管道式反应器的管道内径在20~35 cm较为合适。

7 光生物反应器循环系统

光生物反应器中藻液的密度是一个不断变化的变量参数, 在不同密度下海藻对生长所需要的各种生长参数要求不同, 能够根据海藻密度变化自动调整海藻生长参数的控制系统是非常重要的。

7.1 营养

养分是影响海藻生长效率的一个重要的控制因素^[36], 培养液必须能提供满足海藻细胞正常生长所需要的各种无机元素^[2], 包括碳、氮、磷、氢、氧、硫、钙、镁、钠、钾和氯等, 同时也需要铁、硼、锰、铜、钼、钒、钴、镍、硅和硒等一些微量元素。某些微量元素可能需要螯合剂, 以便让它们溶解或尽量减少毒性^[37]。

海藻在不同的生长阶段, 对反应器补充的营养液用量是不同的, 通过藻液循环混合系统补充新鲜的培养液十分方便, 并可根据海藻生长参数的需要, 通过控制系统对反应器系统进行连续和定量的补充营养液, 以满足海藻生长的需要。

7.2 溶氧

氧气是光合作用的产物, 在户外强大的阳光下, 海藻光合作用产生的 O_2 在反应器管道中沿梯度转移, 在管道排气出口处, 溶解氧值超过空气 O_2 的饱和度可达400%^[38]。即使反应器培养液在高浓度 CO_2 的状况下, 溶解氧也会抑制海藻的生长^[39, 40]。藻液中的溶解氧大大高于空气中氧的饱和度时(7.5 mg/Lat 30 °C), 海藻对溶解氧抑制光合作用的承受力约为2~3 h^[29], 溶解氧过度饱和超过海藻接受的水平都会对海藻产生氧抑制而造成生产率的损失^[38]。

在反应器设计中解决溶氧主要有两种方案 (1) 一个有完善的循环混合装置的系统能增加藻液的流动性, 藻液有效的流动性和混合可以加快 O_2 和藻液的分离; (2) 利用设备分离 O_2 。在反应器系统安装高效的脱气设备^[29]、与反应器结合的泵和气体交换装置可有效去除光合作用产生的 O_2 ^[41]。

7.3 pH

pH 是海藻培养过程中非常重要的影响因素, 藻液中 pH 的变化直接影响海藻细胞内外的离子平

衡、细胞的渗透性及有关膜的结构组成, pH 的过高或者过低都会影响海藻的生长^[42]。反应器系统的检测装置根据海藻在不同生长阶段需要的pH值最佳参数, 应能够自动控制pH值调节液的输入量。

pH值调节液输入反应器管道内, 在藻液循环流动过程中迅速混合、扩散, 从而有效地调节藻液的pH值, 使藻液保持稳定的最适合海藻生长的pH浓度, 使海藻快速生长并达到高密度。

7.4 循环和混合

光生物反应器与泵组合可以构成最适合培养海藻的循环系统。保持反应器内藻液循环流动是重要和必要的, 不但有利于保持海藻细胞处于悬浮状态, 提高光能利用效率和降低光抑制; 流动的藻液还能提高CO₂气体的交换率和加快溶解速度; 有利于海藻产生的O₂从藻液中分离, 降低溶解氧对海藻光合作用的抑制; 同时还有利于帮助养分、pH均匀分布和消除藻液的热分层^[38, 41]。

8 总结

管道式光生物反应器具有光照表面积大、光能和CO₂利用率较高、生长参数容易控制、培养环境非常稳定、容易控制污染、结构简单、投资成本相对便宜的特点。与泵和控制系统组合可以构成最适合培养海藻的循环混合系统, 各种生长参数及工艺可以采用自动化、集约化控制和管理, 可以提高生产效率和产品质量, 是最适合户外大规模培养海藻的反应器之一。

CO₂和溶解氧在管道内呈梯度分布, 管道的直径决定了反应器利用光能效率和对环境温度的热容量; 在培养海藻过程中需要持续不断地增加新的营养液和调节pH值, 一个高效、可自动调节的藻液循环混合系统是非常重要的。能自动清洗管道内壁是光生物反应器是否可用于工业化生产的关键。

[参 考 文 献]

- [1] Stuart M. Can algae save the world - again? [EB/OL]. <http://www.reuters.com/article/environmentNews/idUSTRE5196HB20090210? pageNumber=2&virtualBrandChannel=0>
- [2] Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv*, 2007, 25(3): 294-306
- [3] Biodiesel production from algae. Department of Energy Aquatic Species Program, National Renewable Energy Laboratory [EB/OL]. http://www.eere.energy.gov/biomass/pdfs/biodiesel_from_algae.pdf.
- [4] 朱建良, 张冠杰. 国内外生物柴油研究生产现状及发展趋势. *化工时刊*, 2004, (1): 23-7
- [5] The hottest 50 companies in bioenergy [EB/OL]. <http://biofuelsdigest.com/blog2/2008/12/22/the-hottest-50-companies-in-bioenergy/>
- [6] Huntley ME, Redalje DG. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(4): 573-608
- [7] Miao XL, Wu QY. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresour Technol*, 2006, 97(6): 841-6
- [8] Cogne G, Cornet JF, Gross JB. Design, operation, and modeling of a membrane photobioreactor to study the growth of the cyanobacterium *Arthrospiraplatensis* in space conditions. *Biotechnol Prog*, 2005, 21(3): 741-50
- [9] Zebib T. Microalgae grown in photobioreactors for mass production of biofuel. [EB/OL]. Rutgers University Department of Bioenvironmental Engineering, September 30, 2008 <http://www.alga.cz/users/papacek/papers/Papacek-Fluent04.pdf>
- [10] Algae-based biofuels: a review of challenges and opportunities for developing countries [EB/OL]. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/ak333e/ak333e00.pdf>: 4.
- [11] Ugwu CU, Aoyagi H, Uchiyama H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresour Technol*, 2008, 99(10): 4021-8
- [12] Tsygankov AA. Laboratory scale photobioreactors. *Appl Biochem Microbiol*, 2001, 37(4): 333-41
- [13] Lefebvre S, Mouget JL, Loret P, et al. Comparison between fluorimetry and oximetry techniques to measure photosynthesis in the diatom *Skeletonema costatum* cultivated under simulated seasonal conditions. *J Photochem Photobiol*, 2007, 86(2): 131-9
- [14] 吴旭, 严美姣. 微囊藻对光照变化的生长响应. *齐鲁渔业*, 2008, 25(11): 45-6
- [15] 曾文炉, 李浩然, 蔡昭铃, 等. 螺旋藻细胞培养与光能利用的关系. *植物资源与环境报*, 2001, 10(3): 7-10
- [16] Richmond AE, Soeder CJ. Microalga culture. *Crit Rev Biotechnol*, 1986, 4(4): 369-438
- [17] 温少红. 螺旋藻培养液光衰减规律的研究. *海洋通报*, 2001, 20(4): 94
- [18] Kaewpinton K, Shotipru A, Powtongsook S, et al. Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor. *Bioresour Technol*, 2007, 98(2): 288-95
- [19] Ogbonna C, Tanaka H. Light requirement and photosynthetic cell cultivation - Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *J Appl Phycol*, 2000, (12): 207-18
- [20] 许海朋, 张晓东, 张杰, 等. 利用微藻生产生物柴油的研究进展. *现代化工*, 2008, 28(10): 19
- [21] Sobczuk TM, Rubio FC, Fernandez FGA, et al. Carbon dioxide uptake efficiency by outdoor microalgal cultures in tubular airlift photobioreactors. *Biotechnol Bioeng*, 2000, 67(4): 465-75
- [22] <http://www.phytolutions.com>
- [23] <http://www.greenfuelonline.com>
- [24] <http://www.algaelink.com>
- [25] <http://www.livefuels.com>

- [26] 岳丽宏, 陈宝智, 王黎, 等. 利用微藻固定烟道气中CO₂的实验研究. 应用生态学报, 2002, (2): 157
- [27] Chae SR, Hwang EJ, Shin HS. Single cell protein production of *Euglenagracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. Bioresour Technol, 2006, 97(2): 322-9
- [28] 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*. Aquaculture, 2005, 249: 311-6
- [29] Suh IS, Lee CG. Photobioreactor engineering: design and performance. Biotechnol Bioprocess Eng, 2003, 8(6): 313-21
- [30] 杨桂娟, 栾忠奇, 周笑辉. 温度对小球藻生长量和溶氧量影响研究. 农机化研究, 2009, (9): 158
- [31] Torzillo G, Sacchi A, Materassi R. Temperature as an important factor affecting productivity and night biomass loss in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular photobioreactors. Bioresour Technol, 1991, 38(2): 95-100
- [32] Thompson PA, Guo MX, Harrison PJ. Effects of variation in temperature. I. On the biochemical composition of eight species of marine phytoplankton. J Phycol, 1992, 28(4): 481-8
- [33] Chisti Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. Trends Biotechnol, 2008, 26(3): 126-31
- [34] 齐沛沛, 王飞. 制备生物柴油用小球藻的油脂富集培养研究. 现代化工, 2008, 28(2): 38
- [35] 清醒看待藻类生物柴油. 科学研究动态检测快报, 2009, (7): 2
- [36] Borowitzka MA, Huisman IM, Osborn A. Culture of the astaxanthin-producing green alga *Haematococcus pluvialis*: I. Effects of nutrients on growth and cell type. J Appl Phycol, 1991, 3: 295-304
- [37] Mandalam RK, Palsson BO. Elemental balancing of biomass and medium composition enhances growth capacity in high-density *Chlorella vulgaris* cultures. Biotechnol Bioeng, 1998, 59(5): 605-11
- [38] Ugwu CU, Ogbonna JC, Tanaka H. Design of static mixers for inclined tubular photobioreactors. J Appl Phycol, 2003, 15(2-3): 217-23
- [39] Lee YK, Ding SY. Effect of dissolved oxygen partial pressure on the accumulation of astaxanthin in chemostat cultures of *Haematococcus lacustris* (Chlorophyta). J Phycol, 1995, 31(6): 922-4
- [40] Aiba S. Growth kinetics of photosynthetic microorganisms. Adv Biochem Eng, 1982, 23: 85-156
- [41] Rubio FC, Fernandez FG, Perez JA, et al. Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. Biotechnol Bioeng, 1999, 62(1): 71-86
- [42] 吴耀庭, 魏东, 陈俊辉. 微藻异养化高细胞密度培养技术及其应用. 中国食品添加剂, 2008(6): 67

生 命 学 科
Chinese Bulletin of Life Sciences
(月刊) (1988年创刊)

2010年5月 第22卷 第5期(总第134期)

Chinese Bulletin of Life Sciences
(Monthly)
(Started in 1988)

May, 2010 Vol. 22 No. 5

©2010中国科学院上海生命科学研究院

编辑出版 管兴华, 岳东方, 于建荣
《生命科学》编辑部
(上海岳阳路319号 邮政编码200031)
电子邮件: cblls@sibs.ac.cn

主编 林其谁 院士
主办 国家自然科学基金委员会生命科学部
中国科学院生命科学与生物技术局
中国科学院生命科学和医学学部
中国科学院上海生命科学研究院

印刷 上海图宇印刷有限公司

发行 上海市报刊发行局

订购 全国各地邮局

国外总发行 中国出版对外贸易总公司
(北京782信箱)

广告经营许可证

3100420080068

©2010 by Shanghai Institutes for Biological
Sciences, Chinese Academy of Sciences

Edited by GUAN Xing-hua, YUE Dong-fang, YU Jian-rong
Editorial Office of Chinese Bulletin of Life Sciences
(319 Yueyang Road, Shanghai 200031, China)

Editor-in-Chief LIN Qi-shui

Sponsored by Department of Life Sciences, National
Natural Science Foundation of China; Bureau of Life
Sciences and Biotechnology, Chinese Academy of
Sciences; Division of Life Sciences and Medicine,
Chinese Academy of Sciences; Shanghai Institutes
for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences

Distributed by Shanghai Post Office

Subscribed by Local Post Offices

Overseas Distributed by China National Publishing
Industry Trading Corporation (P. O. Box 782, Beijing,
China) Cable: CNPITC



中国标准连续出版物号

ISSN 1004-0374
CN 31-1600/Q

邮发代号: 4-628

国外发行代号: DK 31002

定价: 30.00元