

夏季室外光生物反应器培养 *Chlorella sorokiniana*

张姗姗, 刘 和*

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 搭建了一个 6 L 容积曝气型垂直柱光生物反应器, 在 6—8 月期间置于室外屋顶运行, 旨在考察夏季室外培养微藻 *Chlorella sorokiniana* 的可行性。室外培养时, 若 pH 超过 8.5, 微藻会出现明显絮凝沉淀现象。太阳光入射到反应器的高达 $(1\,700 \pm 137) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照强度带来的光抑制作用及随之引起的超过 48 °C 的高温, 对微藻细胞的损伤造成了室外培养的抑制现象。当培养液温度超过 40 °C 时, *Chlorella sorokiniana* 几乎不能生长。在反应器周围放置金属镀层反射隔热膜反射板, 可以减少 $(42.21 \pm 4.7)\%$ 的光照强度, 使培养液温度下降 2~4 °C, 但晴天时光照强度仍然可达 $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上, 光抑制作用不能很好被解除。为实现微藻在室外反应器中可持续地快速增长, 仍需进一步采取措施减弱光照强度。

关键词: 微藻; 光生物反应器; 室外培养; 光照强度; 温度

中图分类号: X 505 文献标志码: A 文章编号: 1673—1689(2015)03—0260—07

Outdoor *Chlorella sorokiniana* Cultivation Using Photobioreactor in Summer

ZHANG Shanshan, LIU He*

(School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aimed to investigate the feasibility of growing *Chlorella sorokiniana* outdoor in summer, a 6 L aerated vertical column photobioreactor was performed from Jun to Aug on the rooftop. When cultivated outdoor, algae auto-flocculation will happen heavily once pH was over 8.5. The photoinhibition caused by high incident light intensity $(1\,700 \pm 137 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ and the algal cells damage resulted from high temperature (48 °C) lead to inhibition of algal growth. *Chlorella sorokiniana* is not able to grow well when temperature is over 40 °C. The installation of reflectors, which covered by reflective thermal insulation mental coatings, could decrease light intensity by $42.21 \pm 4.7\%$, resulting in 2~4 °C temperature decrease. However, light intensity still could be more than $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ on sunny days, making photoinhibition hard to be relieved. To achieve faster algal growth as well as continuous cultivation outdoor, more effort should be made to moderate the light intensity.

Keywords: microalgae, photobioreactor, outdoor cultivation, light intensity, temperature

收稿日期: 2014-03-26

基金项目: 国家新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0455)。

* 通信作者: 刘 和(1974—), 男, 江西吉安人, 工学博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事污泥无害化、资源化及环境微生物技术应用于污染控制的研究。E-mail: liuhe@jiangnan.edu.cn

近些年来,以可固定 CO_2 的微藻为原料生产环境友好型第三代生物燃料的研发引起广泛关注,目前大多数研究仍停留在实验阶段,其商业化生产面临的最突出的瓶颈是培养成本过高^[1]。Norsker 等指出^[2],约有 7%~11% 的微藻培养成本来自于化学药品的使用,其中氮磷是微藻培养所需的主要化学药品,占到 80%~85%。大量研究表明,利用富含氮磷的废水培养微藻不但可以减少微藻培养营养盐投入,而且能在用生物法处理废水的同时,生产可转变为生物燃料的微藻生物质^[3-4]。若在该生物处理法运行过程中,利用免费且持续存在的太阳光作为替代光源,将会有效地进一步减少微藻产生物燃料的总体投入^[5]。有很多研究已经尝试在室外培养微藻,常用的培养装置主要分为两类:开放的跑道式培养池及封闭的光生物反应器。后者又包括垂直曝气柱状、管状及平板式光生物反应器等。

不论使用何种设计的反应器,在培养过程中都必须考虑以下几个影响微藻生长的环境因素:营养盐供应、pH、混匀、气体交换、温度及光照。其中,前四者可通过化学或物理的方法进行有效控制,如 Huang 等^[6]为平板式光生物反应器专门设计了 3 种特殊搅拌器,以提高光暗循环及提高微藻生长速率。然而在室外培养时,入射至反应器的单位面积光照强度及培养液温度很大程度上取决于当地的天气、季节及时间,因此有较大的波动。本文作者在 6~8 月期间研究夏季阳光充裕时进行微藻室外培养的可行性及可能遇到的主要瓶颈,所用反应器为 6 L 容积曝气型垂直柱状光生物反应器,微藻培养模式是光合自养型。封闭光生物反应器可以避免杂菌的污染,减少水分的损失且较容易控制反应器内运行条件^[7]。

1 材料与方法

1.1 微藻的接种培养

所用微藻 *Chlorella sorokiniana* 211/8k, 购买于英国剑桥的藻类及原生物培养中心。所用培养基是 BG11 培养基。微藻的接种培养在 8 个 250 mL 容积经过灭菌处理的蓝盖试剂瓶中进行,每个瓶子配有一个自制的插入通气管的培养棉塞,以 10 mL/min (0.05 L/(L·min)) 的速率持续通入质量分数 5% 的 CO_2 ^[8]。培养灯光来自于 3 个 40 W 荧光灯,光照强度为 $(62.1 \pm 3.2) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光照时间为 24 h。

培养温度为 $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 。

1.2 培养装置的搭建

图 1 为一个 3 层的带万向轮的不锈钢支架,最上面放置光生物反应器;中间为辅助设施,如 CO_2 气瓶,进料蠕动泵 (Cole-Parmer, L/S 07553-77 分体式驱动器, L/S Easy-Load II 77200-62 泵头, 美国制),空气泵 (HIBLOW, C-5F, 菲律宾制),调控 CO_2 及空气比例的气体流量计 (Dwyer, RMC-101-SSV, 美国制)等;下面放置新进料及微藻收获液;旁边配置了防雨电源箱。此外,使用的蠕动泵、空气泵虽是防水的,但为了保护这些易耗损的装置,试验后期仍为中间层安装了防雨亚克力塑料厢。

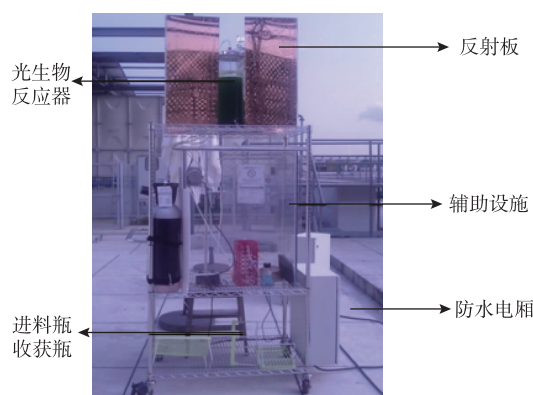


图 1 室外微藻培养系统

Fig. 1 Outdoor microalgae cultivation system

1.3 微藻培养液的准备

首先将按 1.1 所述方法培养得到的处于对数生长期的藻液在 3 500 r/min 转速下离心 5 min 进行浓缩,用蒸馏水洗两遍后,加一定体积的浓缩藻液到已经调节 pH 于 6.5~7.5 之间的新鲜配置的 5 L BG11 培养液中,用蠕动泵将混合均匀后的微藻培养液转移至经 121 $^\circ\text{C}$ 、20 min 高压灭菌的反应器中,于室内培养。质量分数 5% CO_2 以 600 mL/min (0.1 L/(L·min)) 的速率从反应器中心通过一个气体分散器连续通入。反应器周围以合理的间隔放置 12 个 LED 灯,提供连续 24 h 光照,正对着 LED 灯的反应器表面及其余地方光照强度分别为 $(133.2 \pm 9.3) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 及 $(78.4 \pm 5.5) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,培养温度为 $(27 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 。用 2 mol/L HCl 调节培养液 pH 至 6.5~7.5。微藻进入对数生长期时,转移 2.5 L 容积室内反应器中的培养液至室外 6 L 容积光生物反应器中,并同时向室内室外反应器中添加 2.5 L 新的 BG11 培养液。

1.4 室内温度调控对微藻生长的影响

将处于对数生长期微藻接种液以 3 500 r/min 离心 5 min 后得到微藻浓缩液,用蒸馏水洗两遍后,取相同体积的浓缩藻液至已调节 pH 的新鲜配置的 4 份 200 mL BG11 培养液中,培养器为 250 mL 的锥形瓶,将这 4 个锥形瓶放置于水浴摇床,调节初始温度为 35 ℃。培养 8 d 后,收获所有的培养液,以 3 500 r/min 离心 5 min 后得到微藻浓缩液。向锥形瓶中加入 200 mL 已调节 pH 的新鲜配置的 BG11,接种相同体积的 35 ℃培养温度下收获的浓缩藻液,调控水浴摇床温度为 38 ℃,培养 8 d。以相同的方式,继续做两个温度梯度,40 ℃及 42 ℃。整个培养过程中,摇床速度控制在 150 r/min 左右,所有培养液中以 10 mL /min(0.05 L / (L·min)) 的速率持续通入质量分数 5% 的 CO₂,光照 12 h,光照由固定在放置于水浴摇床上方支架上的 4 个 LED 灯提供,光照强度为 (43.1±2.6) μmol/(m²·s)。

1.5 自制反射光装置的安装

运行后期,两块贴有金属镀层反射隔热膜(美国 3 M) 的自制反射板分别放置在光生物反应器两侧(见图 1),用于减弱太阳光直射,缓解反应器表面光照强度及下调培养液温度。

1.6 分析指标及方法

pH 用 Mettler Toledo G20 型 Compact 滴定仪的 pH 探针 DG115-SC 进行测量;光密度 OD₇₅₀ 用紫外分光光度计(Varian, Cary 50 型,美国制)测量;所有样品经 0.45 μm 滤膜过滤后用 Hach 试剂盒 TNT 系列进行硝态氮、总磷的测定,由 Hach DR/2800 型分光光度计读取最终浓度;光照强度通过带有 LI-192SA 水下量子传感器的 LI-250A 测光计(LI-COR, 美国制)测量所得;温度由插入到反应器中的内置式温度计自动读取;以 OD₇₅₀ 为生长指标,微藻比生长速率的计算依据 OD₇₅₀ 自然对数相对于培养时间的线性回归方程计算。

2 结果与讨论

2.1 微藻在室内外光生物反应器中的生长状况

图 2 以 OD₇₅₀ 为生长指标,绘制了微藻在未添加反射装置前室内外 6 L 容积光生物反应器中的生长趋势。可以看出,室内微藻生长明显优于室外。在初始 2 d,处于对数生长期的微藻在室内光生物反应器中仍保持增长趋势,OD₇₅₀ 从 1.710 增长至

3.604,最大生长速率为 0.619 d⁻¹,在第 3 天开始出现轻微下降,微藻进入稳定期,接下来是衰亡期。

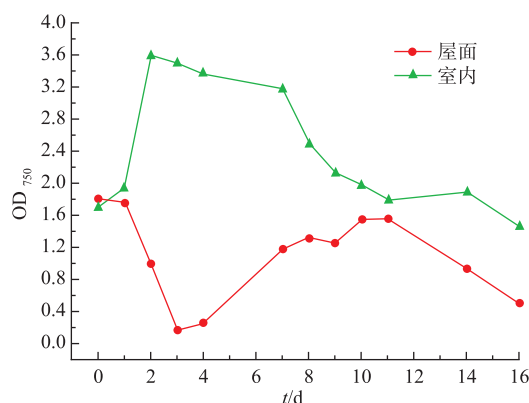


图 2 室内外光生物反应器中微藻的生长

Fig. 2 Microalgal growth in indoor and outdoor photobioreactors

前 3 d 内楼顶反应器中微藻却呈持续下降趋势,甚至第 3 天时,微藻出现大量絮凝沉淀,致使培养液 OD₇₅₀ 仅为 0.181,培养液颜色经历了深绿、浅绿至浅黄的变化。然而,在第 4 天下过雨后,室外反应器中微藻开始出现再次生长的现象,OD₇₅₀ 有微小回升,继续放置 3 d 后,OD₇₅₀ 增加至 1.194,3 d 内的增长速率为 0.511 d⁻¹,其生长曲线类似于微藻的对数增长期,第 7 天后 OD₇₅₀ 缓慢增长至 1.571 后开始快速下降。室外反应器中微藻的生长在整体上并不乐观,中间甚至经历了大多数微藻严重附着于反应器壁上,同时也有大量微藻沉在反应器底部。分析可能的原因有 3 个:培养液中 pH 上升致使微藻与培养液中镁、钙、磷等元素发生絮凝沉淀;长时间地接受直接阳光照射使微藻光合机制受到损伤;培养液温度升高超过了微藻可以忍耐的温度。

2.2 pH 变化对微藻生长的影响

如图 3 所示,室内反应器中前 2 d 的 pH 持续增长,这是由于用以硝酸钠为氮源的 BG11 培养基作为微藻培养液时,随着微藻的增长,硝态氮的消耗会使培养液中 pH 呈上升趋势。而在室外反应器中,前 2 d pH 维持在 7 左右,培养液中硝酸钠质量浓度仅消耗 15 mg/L,这与图 2 中表现出的微藻下降趋势相符。第 4 天时,pH 突然增长至 9.57,主要原因是 CO₂ 被用完,微藻 OD₇₅₀ 的下降趋势比第一两天更快,降至 0.181,微藻出现大量絮凝沉淀。Suknik 等^[9]报道了不同 pH 条件下室外培养液中发生絮凝沉淀后微藻生物量的去除率,在 pH 5.0~7.5

之间,微藻不会发生絮凝沉淀,但 pH 超过 8.5 时,开始呈现明显絮凝沉淀现象,甚至有 98% 的微藻生物量会从培养液中被去除。

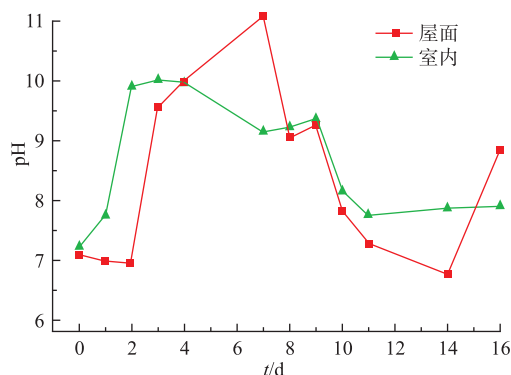


图3 室内外光生物反应器中的 pH 变化

Fig. 3 pH variations of indoor and outdoor photobioreactors

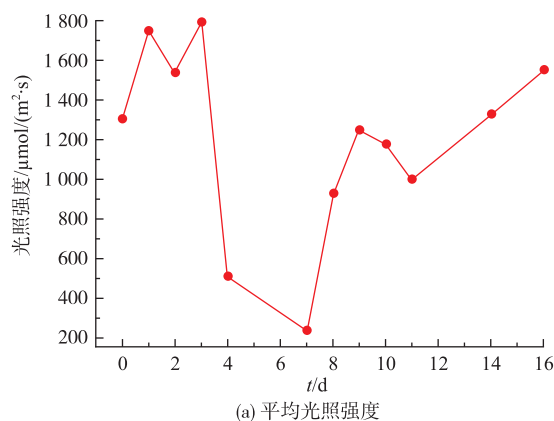
然而,第4天微藻出现大量絮凝沉淀后的3 d内,由于没有及时更换新的 CO_2 气瓶,pH 继续维持上升至 11.102,微藻却呈现再次生长的趋势。与室内反应器的运行进行对比,虽然 Gordon 等^[10]指出,室内培养时,当曝气且 pH 缓冲能力较差的培养液 pH>10 时,培养液中微藻会与钙、镁、磷等元素发生絮凝沉淀。但结合图 2 知,pH 在 10 左右的室内培养液中并没有出现严重的微藻附着现象,只表现出轻微的 OD_{750} 下降趋势。因此,室外培养时,pH 升高可能是引起微藻发生絮凝沉淀的原因,但并不是关键因素。

2.3 光照强度及培养液温度对微藻生长的影响

光照是微藻自养培养光合作用所必需的,光照强度、波长范围、光照时间是优化微藻产率主要考虑的三大因素。其中,光照强度是最重要因素,低于最优点时,它会成为一个限制因素。营养物充足时,提高光照强度会促进微藻光合作用,一旦超过该饱和点,继续增加会破坏微藻光受体、降低光合活性,该现象被称为光抑制。太阳光是室外光合自养系统的主要光来源,它包含全部光谱,可以通过过滤为特定种属微藻的培养提供合适波长的光和辐射,但光照强度却是一个不可调控的因素。微藻生长的最佳光照强度一般低于 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。然而,太阳光所能提供的光照强度一般都远远大于最佳值,到达地面的光强在 $1\,800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以上,晴天时甚至会超过 $2\,000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。这比建议的最佳光照

强度高出 10 倍^[11]。长时间直接入射这样光照强度的阳光,会损伤反应器中微藻光合色素,从而破坏光合机制,致使培养中微藻延迟生长或失去活性,发生絮凝沉淀^[12]。

图 4(a)为室外培养过程中早上 10:00 至下午 17:00 之间每半个小时在反应器表面随机取 5 个点测得的平均光照强度,图 4(b)为同一时间培养液温度。Li 等^[13]研究了不同光照强度对绿藻 *Pseudochlorococcum* sp. 生长的影响,结果显示,光照强度在 $20\sim 300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 没有出现光抑制现象,在 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时开始出现轻微的光抑制现象,随着光照强度升高至 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光抑制现象越来越严重。在本研究中,1~3 d 内光照强度平均为 $(1\,700\pm 137) \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,微藻经历了严重的光抑制。此外,由图 4(b)知,1~3 d 内培养液温度持续上升,最高温度达 $48.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。Wu 等^[14]的研究表明,微藻 *Monoraphidium* sp. SB2 可以在 $25\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 下生长良好,在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时出现衰退。Park 等^[15]指出,虽然微藻生长的最佳温度取决于藻种及培养液中营养物浓度,但大多数藻种适宜生长的温度均在 $28\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 之间,突然的温度变化会大幅度降低微藻的产率。1~3 d 内光照强度及温度的变化合理解释了图 2 中初始 3 d 室外微藻 OD_{750} 的持续下降。由于连续 3 d 的降雨,第 4—7 天光照强度突然下降,低至 $244 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,温度下降至 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,室外微藻 OD_{750} 开始回升。第 8 天转晴后,随着光照强度的增加,培养液温度逐渐回升,室外微藻 OD_{750} 维持 3 d 后(见图 2)再次出现快速下降。这充分证明,到达反应器表面的光照强度及培养液温度是影响微藻室外培养的限制性因素。



(a) 平均光照强度

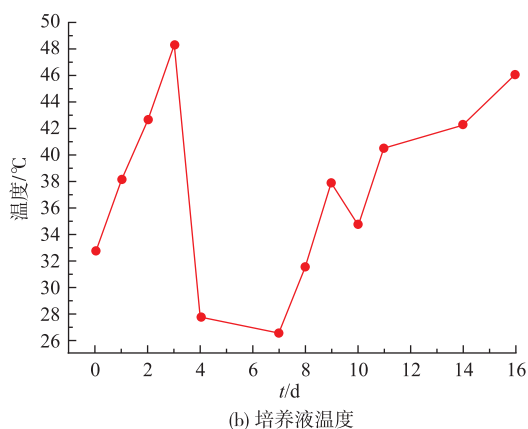


图 4 室外反应器表面光照强度及培养液温度

Fig. 4 Light intensity on the surface of outdoor photobioreactor and temperature of culture

2.4 温度影响微藻生长的室内验证

大多数工业用微藻都是嗜中温型的,最佳生存温度在 20~30 °C 之间。然而,室外培养系统受温度及光照影响很大,其中光照又是培养液热度的主要来源。Quinn 等^[16]指出,微藻培养液可以 100% 吸收入射太阳光的所有光谱,但仅有 5% 甚至更少被转换为生化能,其余能量就贡献给了培养液的热量,单独依靠反应器外的热对流不能有效降低培养液温度,在晴天时反应器中温度甚至可能超过 55 °C,这是需要被避免的。

为了找出 *Chlorella sorokiniana* 可以承受的最高温度,在实验室水浴摇床内进行了一批逐渐升温的驯化培养试验,温度分别为 27、35、38、40 °C 及 42 °C。微藻在这几组温度下的生长状况见图 5。可以明显看出,27 °C 及 35 °C 下的微藻生长良好且前者可以较快地进入稳定期,最大比生长速率分别为 $(0.735 \pm 0.02) \text{ d}^{-1}$ 和 $(0.278 \pm 0.008) \text{ d}^{-1}$; 当温度在

38 °C 及 40 °C,微藻生长非常缓慢,最大比生长速率仅为 $(0.148 \pm 0.004) \text{ d}^{-1}$; 在 42 °C 时,微藻完全不可以生长。因此,认为本课题研究所用藻种培养温度不适宜超过 40 °C,结合图 2 及图 4(b),合理解释了室外反应器中第 2 天后微藻 OD₇₅₀ 的加速下降。de-Bashan 等也证明小球藻 *Chlorella sorokiniana* 在经历 5 d 的适应期后可以在 40 °C 下生长^[17]。

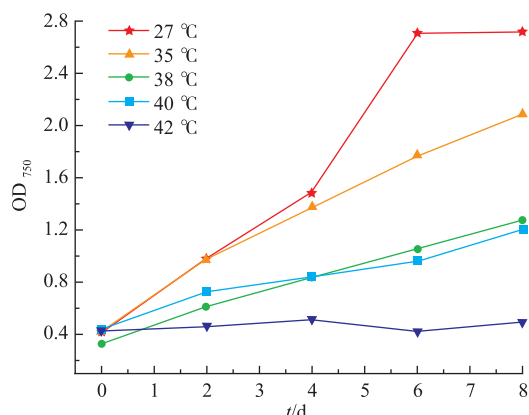


图 5 室内不同温度下微藻的生长

Fig. 5 Microalgal growth under different indoor temperatures

2.5 反射光装置的安装对室外培养系统的影响

通过分析总结得知,室外培养时,微藻培养液可以吸收除了微藻进行光合作用所需的波长 400~700 nm 外的其它光谱,这加大了培养液的热度负荷。因此,限制微藻在室外光生物反应器中生长的主要因素是太阳光入射到反应器的高光照强度及随之引起的培养液高温。基于这个原因,在反应器左右两边分别放置了贴有金属镀层反射隔热膜(美国 3 M)的反射板。表 1 列出了安装反射膜前后室外培养系统中光照强度、培养液温度变化及微藻生长状况。

表 1 安装反射装置前后室外培养条件及微藻生长状况的变化

Table 1 Change of outdoor cultivation conditions and microalgae growth after reflectors installation

反射装置	光照强度/ $(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	初始 OD ₇₅₀	最高 OD ₇₅₀	最大比生长速率/ d^{-1}
无	1 266±312	36.38±2.23	0.831	1.571	0.185
有	723±249	34.04±2.55	0.736	1.940	0.222

注:表 1 中温度是上午 10:00 至下午 17:00 所有读数的平均值。

图 6 为安装反射板前后,1 d 内不同时刻反应器表面光照强度及微藻培养液中温度的变化,光照强度在每天上午 10:00 到下午 17:00 之间,每 30 min 随机在反应器表面取 5 个点测量其平均值,温度由内置式温度计每隔 4 min 自动读取。在上午 10:00

至下午 17:00 光照加强、温度上升期间,安装反射装置的反应器中有 $(42.21 \pm 4.7)\%$ 入射光被反射,但光照强度依旧可以达到 $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上。Liu 等指出^[18],通过在反应器表面添加特殊材质的反射膜可以减少 50% 的培养液热负荷。结合表 1 知,光

照强度下降 (543 ± 175) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 温度降低 $2 \sim 4$ $^{\circ}\text{C}$, 最高在 36 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

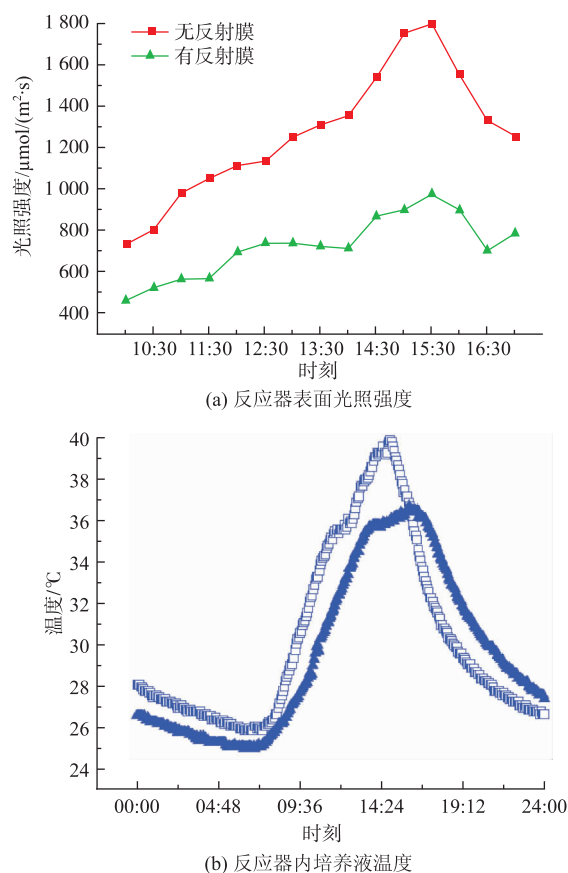


图 6 安装反射装置前后一天内不同时刻反应器表面光照强度及培养液温度

Fig. 6 Light intensity on the surface of reactor and culture temperature during different moment before and after reflectors installation

然而,由表 1 可以看出,安装反射装置后,在初

始 OD_{750} 相差不大的状况下,虽然反映其表面光照强度减弱,培养液中温度有所下降,微藻生长并未得到明显改观,能达到的最高 OD_{750} 仅比没有安装反射装置条件下高出 19%,最大比生长速率高出 16.7%。这是由于即使反射装置的安装可以减弱 (42.21 ± 4.7)% 的光照强度,到达反应器表面的光照强度仍然可以达到 $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上(见图 6),光抑制作用并没有得到缓解。因此,微藻室外生长最重要的限制因素是过高的光照强度。Monica 等也指出,微藻室外培养产率很大程度上被光饱和效应限制^[9]。目前还没有实现室外微藻的可持续培养,仍需要进一步改善装置来减弱可到达光生物反应器表面的光照强度。

3 结 语

室外运行光生物反应器进行微藻培养,当培养液 pH 超过 8.5 时,微藻会出现明显絮凝沉淀现象,甚至有 98% 的微藻生物量会从培养液中被去除。pH 升高可能是引起微藻发生严重絮凝沉淀的原因之一,但并不是关键因素。限制微藻在室外光生物反应器中良好生长的关键因素是太阳光入射到反应器的高达 (1700 ± 137) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照强度所带来的光抑制作用,以及随之引起的 48 $^{\circ}\text{C}$ 高温对微藻细胞的损伤。当培养液温度超过 40 $^{\circ}\text{C}$ 时, *Chlorella sorokiniana* 几乎不能生长。反射装置的安装可以减少 (42.21 ± 4.7)% 的光照强度,使培养液温度下降 $2 \sim 4$ $^{\circ}\text{C}$,但反应器表面的光照强度仍然达到 $900 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以上,过高的光照强度是微藻室外培养的最大限制因素。微藻的室外培养尚未实现可持续增长,仍需要进一步改善装置减弱光照强度。

参考文献:

- [1] Williams P J B, Laurens L M L. Microalgae as biodiesel & biomass feedstocks: Review & analysis of the biochemistry, energetics & economics[J]. *Energy Env Sci*, 2010, 3(5): 554–590.
- [2] Norsker N H, Barbosa M J, Vermue M H, et al. Microalgal production—a close look at the economics [J]. *Biotechnol Adv*, 2011, 29(1): 24–27.
- [3] Andriana F A, Marios A. Selection of microalgae for wastewater treatment and potential lipids production[J]. *Bioresour Technol*, 2013, 147: 130–134.
- [4] Ashish K S, Jon S, Tina T. Utilisation of wastewater nutrients for microalgae growth for anaerobic co-digestion [J]. *J Environ Manage*, 2013, 122(15): 113–120.
- [5] Feng P Z, Deng Z Y, Hu Z Y, et al. Lipid accumulation and growth of *Chlorella zofingiensis* in flat plate photobioreactors outdoors [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(22): 10577–10584.

- [6] Huang J K, Li Y G, Wan M X, et al. Novel flat-plate photobioreactors for microalgae cultivation with special mixers to promote mixing along the light gradient[J]. **Bioresour Technol**, 2014, 159(1):8–16.
- [7] Singh R N, Sharma S. Development of suitable photobioreactor for algae production—A review [J]. **Renew Sust Energ Rev**, 2012, 16(4):2347–2353.
- [8] Lim C Y, Chen C L, Wang J Y. A strategy for urban outdoor production of high-concentration algal biomass for green biorefining [J]. **Bioresour Technol**, 2013, 135:175–181.
- [9] Sukenik A, Schroder W, Lauer J, et al. Coprecipitation of microalgal biomass with calcium and phosphate ions [J]. **Water Res**, 1985, 19(1):127–129.
- [10] Gordon M S, Chapman D J, Kawasaki L Y, et al. Aquacultural approaches to recycling of dissolved nutrients in secondarily treated domestic wastewaters—IV: Conclusions, design and operational considerations for artificial food chains [J]. **Water Res**, 1982, 16(1):67–71.
- [11] Kumar K, Dasgupta C N, Nayak B, et al. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria[J]. **Bioresour Technol**, 2011, 102(8):4945–4953.
- [12] Wang J, Han D, Lu C, et al. Effect of initial biomass density on growth and astaxanthin production of *Haematococcus pluvialis* in an outdoor photobioreactor[J]. **J Appl Phys**, 2013, 25(1):253–260.
- [13] Li Y, Han D, Sommerfeld M, et al. Photosynthetic carbon partitioning and lipid production in the oleaginous microalga *Pseudochlorococcum* sp.(Chlorophyceae) under nitrogen-limited conditions[J]. **Bioresour Technol**, 2011, 102(1):123–129.
- [14] Wu L F, Chen P C, Lee C M. The effects of nitrogen sources and temperature on cell growth and lipid accumulation of microalgae [J]. **Int Biodeterior Biodegr**, 2013, 85:506–510.
- [15] Park J B K, Craggs R J, Shilton A N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production [J]. **Bioresour Technol**, 2011, 102(1):35–42.
- [16] Quinn J C, Yates T, Douglas N, et al. Nannochloropsis production metrics in a scalable outdoor photobioreactor for commercial applications[J]. **Bioresour Technol**, 2012, 117:164–171.
- [17] de-Bashan L E, Trejo A, Huss V A R, et al. *Chlorella sorokiniana* UTEX 2805, a heat and intense, sunlight-tolerant microalga with potential for removing ammonium from wastewater[J]. **Bioresour Technol**, 2008, 99(11):4980–4989.
- [18] Liu J, Zheng S, Gerken H. Recent Advances in Microalgal Biotechnology[M]. [S.I.]: OMICS Group eBooks, 2014.
- [19] Monica M, Agnese C, Marco B. Experimental investigation of a local recirculation photobioreactor for mass cultures of photosynthetic microorganisms[J]. **Water Res**, 2014, 55(2):29–39.

会 议 信 息

会议名称(中文): 第四届中国食品与农产品质量安全检测技术国际论坛

开始日期: 2015-06-16

结束日期: 2015-06-18

所在城市: 北京市 朝阳区

具体地点: 北京国际会议中心

主办单位: 中国仪器仪表学会分析仪器分会 中国仪器仪表行业协会分析仪器分会 中国质量检验检疫学会

联系人: 于健

联系电话: 010-82967481 82967491

传真: 010-82967471

E-MAIL: cfas@lanneret.com.cn

会议网站: <http://www.cfaschina.com/>

会议背景介绍: 中国食品与农产品质量安全检测技术国际论坛暨展览会(简称 CFAS), 已成功地举办了三届, 学术报告质量、参会人员数量、参展商规模等都在逐届增长, 现已成为我国学术水平最高、规模最大的食品与农产品安全检测技术盛会, 是我国食品与农产品质量安全检测技术权威性的学术论坛及展示平台, 为政府、学者、用户、仪器制造商提供了卓有成效的沟通 and 交流平台, 推动了我国食品与农产品质量安全检测技术的发展, 促进了国内外食品与农产品质量安全检测技术的相互交流, 提高了我国食品与农产品质量安全检测技术的水平。为了进一步推进我国食品与农产品质量安全检测技术行业的发展, 交流国内外先进技术和应用成果, 中国仪器仪表学会分析仪器分会、中国仪器仪表行业协会分析仪器分会、中国质量检验协会联合, 将于 2015 年 6 月 16 日至 18 日, 在北京国家会议中心举办“第四届中国食品与农产品质量安全检测技术国际论坛暨展览会(简称 CFAS 2015)”。鉴于食品安全是前题, 营养价值是根本, 确保人民健康是最终目的, 本届将围绕“进一步提高食品安全和营养的检测水平, 确保人民健康”为主题, 开展学术交流和展示活动。