

大型工业光反应器生产高含油藻粉的理论模型 预测及实验研究

黄 聪¹, 何 荣¹, 魏 帅¹, 陈湛平¹, 李 俊², 杨黄鹏²,
王珍懿³, 辛 凯³, 程 军^{3,4}

(1. 广东粤电湛江生物质发电有限公司, 广东 湛江 524300; 2. 广东粤电环保有限公司, 广东 湛江 510630;
3. 浙江大学 能源高效清洁利用全国重点实验室, 杭州 310027; 4. 重庆大学
低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:工业规模的光自养微藻生物质中油脂含量低, 无法满足制生物柴油要求, 培养过程缺少指导, 且现有理论模型在工业规模下缺乏应用验证。为了对大型工业光反应器生产过程进行预测和调整, 分析探讨了高含油量微拟球藻培养的技术难点和改进措施, 基于一种光吸收系数(f_2)估测方法和最大生物质产量的理论模型, 提出了一套低成本高含油量微藻培养方案, 并在工程中进行实践检验。实践表明: 在以跑道池 26 为光反应器, 藻液高度 15 cm, 氮供应量为改良 f/2 培养基的 1/9 条件下, 成功生产出油脂含量高于 30% 的微拟球藻藻粉。综上, 所建立的微藻光合生长预测模型可行, 通过调整跑道池藻液高度和培养基氮元素含量, 可生产出高含油量微拟球藻藻粉。

关键词:理论模型; 高含油量; 生物质产量; 微拟球藻; 工业生产

中图分类号: Q815; TE667

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2025)09-00101-07

Theoretical model prediction and experimental study on production of high oil content algae powder in large industrial photobioreactors

HUANG Cong¹, HE Rong¹, WEI Shuai¹, CHEN Zhanping¹, LI Jun²,
YANG Huangpeng², WANG Zhenyi³, XIN Kai³, CHENG Jun^{3,4}

(1. Guangdong Yuedian Zhanjiang Biomass Power Co., Ltd., Zhanjiang 524300, Guangdong, China;
2. Guangdong Yuedian Environmental Protection Co., Ltd., Zhanjiang 510630, Guangdong, China;
3. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
4. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of
Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Industrial-scale photoautotrophic microalgae biomass has low oil content, which cannot meet the requirements for biodiesel production. The cultivation process lacks guidance, and existing theoretical models have not been verified for industrial-scale applications. To predict and adjust the production process of large-scale industrial photobioreactors, the technical challenges and improvement measures for producing high oil content *Nannochloropsis oceanica* biomass were analyzed and discussed. Based on a light absorption coefficient (f_2) estimation method and theoretical model of maximum biomass yield, a

low-cost cultivation scheme to produce high oil content *N. oceanica* biomass was proposed, which was tested in a factory. Practice showed that under the conditions of runway pool 26 as a photoreactor, algal solution height of 15 cm, and nitrogen supply of 1/9 modified f/2 medium, the algal powder of *N. oceanica* with oil content

收稿日期: 2024-07-18; 修回日期: 2025-06-14

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2022B0111130003);
浙江省领雁研发攻关计划(2024C03110)

作者简介: 黄 聪(1970), 男, 高级工程师, 研究方向为工业
废物资源化利用(E-mail) huangcong1@geg.com.cn。

通信作者: 程 军, 教授, 博士生导师(E-mail) juncheng@zju.
edu.cn。

higher than 30% was successfully produced. In conclusion, the established model for predicting the photosynthetic growth of *N. oceanica* is feasible, and by adjusting the height of the algal solution in the runway pool and the nitrogen content of the culture medium, the algal powder of *N. oceanica* with high oil content can be produced.

Key words: theoretical model; high oil content; biomass yield; *N. oceanica*; industrial production

随着人们对环境和健康问题的关注日益增加,微藻固碳逐渐成为碳捕集利用与封存(CCUS)技术的焦点,同时微藻产品也是保健产品的常见原料之一^[1]。大量的实验表明,微藻在各类不同环境条件下生长差异显著^[2-4]。现阶段,研究人员主要通过实验研究微藻在不同条件下的生长情况。但是在实现微藻规模化培养的过程中,通过实验确定所有工况下微藻生长情况不仅造成资源巨大浪费,而且几乎无法完成。目前,对微藻的研究通常还处于经验和实验阶段,缺乏统一的理论体系和通用的计算理论模型来预测微藻的生长。

已有许多学者针对微藻生长的理论模型和计算方法开展了研究。Tan等^[5]将一种多变量化学计量学方法应用于微拟球藻(*Nannochloropsis* sp.)等藻类的中红外成像数据集上,进行微藻细胞油脂-蛋白质比率的预测。Schneider等^[6]在研究海洋微藻的密度和比热容等热物理性质的实验中,在不同大气压、温度和总固体含量(TS)条件下测定了海洋微藻的热物理性质,建立了热物理性质参数与温度和TS的函数方程。Giraldo-Zuluaga等^[7]提出了一种基于统计特征结合人工神经网络的自动识别模型,用于微藻计数。然而,迄今为止的各类研究仍然没有建立一套预测微藻生长的通用理论模型,未能定量解释同一微藻藻株在不同环境条件下展现出不同生长规律的原因。

规模化培养高含油量光合固碳微藻是微藻固定烟气CO₂转化制生物柴油技术的关键难点之一^[3]。在工程条件下获取高含油量微藻藻粉缺少成功案例。作者曾多次采集山东某微藻养殖基地产出的藻粉样本,其含油量始终在12%~15%,难以满足利用藻粉生产生物柴油的要求。因此,本文提出了一种基于比色法精确获取光合电子传递速率(ETR)计算公式中光吸收系数(f_2)的方法,进而得到真实有效的ETR,构建了预测微藻在混合均匀或分区域混合均匀的反应体系中生长的计算模型,并使用该模型指导工业培养条件优化改良,以期验证该模型在大规模工业应用中的可行性并大规模生产油脂含量高于30%的微拟球藻藻粉。

1 微藻光合生长理论

微藻中光系统Ⅱ的相对电子传递速率(rETR)计算公式见式(1)^[8]。

$$r_{\text{ETR}} = R_{\text{PA}} \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (1)$$

式中: r_{ETR} 为rETR值; R_{PA} 为光通量密度; Φ 为光系统Ⅱ的有效量子产率; f_1 为两个光系统间的能量分配系数,通常取0.5; f_2 为光吸收系数。

f_2 表示入射光中被吸收部分的占比,反映了植物或微藻在光合作用中实际光吸收能力。在微藻生长周期中, f_2 是一个动态变化的数值, f_2 的实时获取在实验过程中十分困难,因此在大多数研究中, f_2 通常取0.84,并用rETR代替真正的ETR,但是此 f_2 无法反映微藻真实的光吸收能力。因此,使用rETR代替ETR预测微藻生长规律时,往往带来很大误差,无法指导工程生产。

基于上述存在的问题,本文提出了一种新的采用光效应比色法估测 f_2 的方法,其公式见式(2)^[9]。

$$f_2 = \frac{(1 - T(\lambda)) - E_m(\lambda) - \beta_x(\lambda)S_c(1080) + \mu\alpha_{\text{sum}}}{1 + \mu} \quad (2)$$

式中: $T(\lambda)$ 为藻液透射率(使用10 mm光程比色皿通过紫外分光光度计测定); $E_m(\lambda)$ 为介质相的总消光系数; $\beta_x(\lambda)$ 为物种特异性散射振幅校正因子,在本文中取近似值1; $S_c(1080)$ 为微藻悬浮液样品中细胞相在1080 nm入射光下的散射率; α_{sum} 为在1080 nm入射光下微藻悬浮样品中细胞相的综合吸收率; μ 为光经过整块微藻悬浮液后在散射和投射之间分配比例; λ 为叶绿素荧光仪调制光波长,取值594 nm。

$E_m(\lambda)$ 的计算公式见式(3)。

$$E_m(\lambda) = \frac{T(\lambda)^{\frac{a-1}{a}} T_{\text{mo}}(\lambda)^{\frac{1}{a}} \left(1 - \frac{4}{3} \pi N_c r^3\right)}{T_{\text{mo}}(\lambda)} (1 - T_{\text{mo}}(\lambda)) \quad (3)$$

式中: $T_{\text{mo}}(\lambda)$ 为培养基的透射率(使用10 mm光程比色皿通过紫外分光光度计测定); N_c 为1 mL藻液中细胞数量(使用显微镜和血球计数板测定); r 为细胞平均半径,cm; a 为自由指定的常数,满足

$\frac{1}{a} > r$, 且取值尽量小。

$S_c(1\ 080)$ 的计算公式见式(4)。

$$S_c(1\ 080) = 1 - T(1\ 080) - \alpha_{\text{sum}} - E_m(1\ 080) \quad (4)$$

α_{sum} 的计算公式见式(5)。

$$\alpha_{\text{sum}} = \frac{T(1\ 080)\alpha_0}{\ln T(1\ 080)} - \frac{\alpha_0}{\ln T(1\ 080)} \quad (5)$$

式中: α_0 为单细胞层的微藻细胞在 1 080 nm 处的固有吸收率,取近似值 0.05。

μ 的计算公式见式(6)。

$$\mu = \frac{S_c(1\ 080) + S_m(1\ 080)}{T(1\ 080) + S_c(1\ 080) + S_m(1\ 080)} \quad (6)$$

式中: $S_m(1\ 080)$ 为藻液中培养基相在 1 080 nm 入射光下散射率,可根据公式 $S_m(1\ 080) = 0.051 \times (E_m(460) - E_m(594))$ 进行计算。

作者前期研究发现,在 1 cm³ 空间内,微藻生长速率与通过光效应比色法公式计算得到的 ETR 之间存在以下线性关系。

$$R_G = A \ln(m \overline{R_{\text{ET}}}) - B \quad (7)$$

式中: R_G 为以 750 nm 处的光密度 (OD_{750}) 为基准的生长速率, d⁻¹; m 为放大系数,在此研究中取 10; $\overline{R_{\text{ET}}}$ 为培养始末使用光效应比色法公式计算得到的 ETR 平均值; A 、 B 为系数,且 $A > 0$, $B > 0$ 。

由式(7)可知,生物质开始积累的条件是 $R_G > 0$, 即 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}}) > \frac{B}{A}$ 。在微藻生长过程中,当通过光合作用固定的能量超过代谢、凋亡和呼吸作用等过程消耗的能量时,培养系统中的生物质开始积累。因此,ETR 代表光合作用的动力,可称之为光合作用动力势,而 $\frac{B}{A}$ 代表了决定微藻生物质是否开始积累的阈值,也就是光反应动力势的阈值。系数 A 、 B 的取值主要由环境条件决定,例如温度、光照和营养元素浓度等。当 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}})$ 趋近于 0 时,无论系数 A 、 B 如何取值, R_G 一定为负数,这表明此工况下,无论如何调整培养条件,都无法使培养系统中的微藻继续生长。因此,培养系统达到理论最大生物质产量的标准是 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}})$ 趋近于 0,在本文中阈值取 0.001。

2 理论模型构建及应用情况

2.1 光生物反应器情况

为了提高微藻油脂含量以满足利用藻粉生产生物柴油的要求,力求在较短时间内产出数百吨含油

量 30% 以上的微拟球藻藻粉,选择山东某微藻养殖基地开展实验研究,该养殖基地使用某燃煤电厂超低排放烟气作为碳源。根据现场调研,养殖基地使用的微藻光生物反应器分别为室外露天跑道池(三面水泥,顶部太阳光入射,在当地企业生产方案中,微藻液面深度保持在 35 ~ 40 cm,单个跑道池占地面积约 1 200 m²)和横管式反应器(石英玻璃管,横向排布,在露天条件下顶部太阳光入射,直径 5 cm,单根长度 100 m)。

2.2 理论模型构建

由上述理论分析和式(1)、式(2)和式(7)可知,微藻生长速率 R_G 与 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}})$ 之间存在线性关系,而计算 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}})$ 所需的各项参数可使用分光光度计和叶绿素荧光仪测定。当 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}})$ 低于阈值时,微藻停止生长。因此,可以根据分光光度计、叶绿素荧光仪的测定结果,以及光生物反应器的结构和光照条件等参数建立模型,然后编程计算光生物反应器中 R_G 或 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}})$ 随微藻光密度 OD_{750} 的变化规律,并推算最大生物质产量。将 $\ln(m \overline{R_{\text{ET}}})$ 达到阈值时的藻密度 OD_{750} 作为该光生物反应器的最大生物质产量。

2.3 工业规模跑道池及管式反应器的微藻生长理论分析

在前期的实验室研究中,本课题组使用改良 f/2 培养基^[9] 在 300 mL 柱式反应器(玻璃材质,直径 62 mm,高 160 mm)中培养微拟球藻,初始藻液 OD_{750} 在 0.2 ~ 0.5 之间。当藻液 OD_{750} 达到 3.0 ~ 3.5 时,藻液颜色逐渐转变为黄绿色,标志着微拟球藻开始油脂积累过程,此时含油量仅为 10% ~ 15%,油脂含量仍较低。当藻液颜色呈现纯净的橙黄色时,藻液 OD_{750} 达到 5.0 ~ 5.5,此时微藻细胞内油脂含量稳定在 30% 以上。如果将藻液颜色开始呈现纯净的橙黄色时的藻密度称为产油转换点,依据前文分析,一个微藻培养系统能够产出含油量达到 30% 藻粉的前提是,该系统中最大生物质产量必须高于产油转换点。根据理论模型,上述藻粉生产条件的前提是,培养系统的理论最大生物质产量必须高于产油转换点。

2.4 应用中技术难题与改进措施

通过 2.2 预测微藻培养系统理论最大生物质产量的方法,计算养殖基地两种光生物反应器的理论最大微藻生物质产量,其结果如图 1 所示。

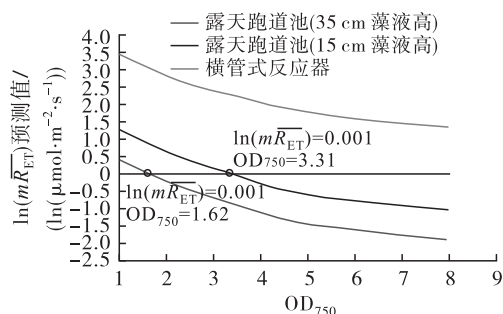


图1 两种室外光生物反应器的理论最大微藻生物质产量

Fig.1 Theoretical maximum microalgal biomass production from two outdoor photobioreactors

由图1可知,采用企业现有培养方案,跑道池藻液高度保持35 cm,则该培养系统的理论最大生物质产量最多只有藻液 OD_{750} 为1.62的水平。若将藻液高度降低至15 cm(此高度为桨轮能够有效驱动藻液流动的最低高度),理论最大生物质产量将上升到藻液 OD_{750} 为3.31。在横管式反应器中,理论最大生物质产量对应的藻液 OD_{750} 可能非常高,甚至远超8。然而在实际生产过程中,由于微藻生长需要消耗大量营养物质,藻液 OD_{750} 难以达到此数值。由以上分析可知,仅改变藻液高度无法使理论最大生物质产量越过产油转换点,因此无法生产高含油量藻粉。

当藻种确定时,产油转换点的 OD_{750} 主要取决于

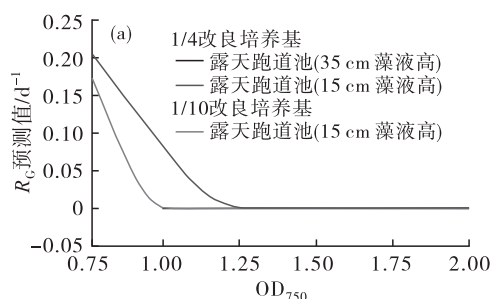


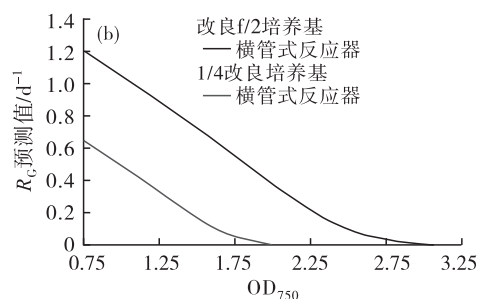
图2 营养不足条件下对两种室外光生物反应器微藻生长速率曲线的估算

Fig.2 Estimation of microalgal growth rate curves for two outdoor photobioreactors under nutrient deficient conditions

由图2a可知,将培养基氮供应量降低至原来的1/4,若跑道池培养系统仍然维持35 cm的藻液高度,则微藻生长速率在 OD_{750} 为0.80以上的范围内基本为0,在实际培养过程中成功的概率较低。若跑道池培养系统的藻液高度降低到15 cm,在实际培养过程中微藻生长速率降低为零时,理论藻液 OD_{750} 为1.18,略低于产油转换点。若进一步降低培养基中氮供应量至改良f/2培养基的1/10,在理想情况下产油转换点降低至 OD_{750} 为0.50~0.55,但生物质产量仅降低至 OD_{750} 为1.0左右。在该情况下,理想产油转换点已经与预测培养系统生物质产量拉开了几乎一倍的差距。表明在培养后期,生物

微藻培养系统的氮供应水平。在使用改良f/2培养基时,产油转换点 OD_{750} 范围为5.0~5.5。在理想情况下,假设微藻代谢水平不变,使用未改良的f/2标准培养基(氮供应量为改良f/2培养基的1/3)时产油转换点降低至 OD_{750} 为1.67~1.83,此数值也超过了藻液高度为35 cm时跑道池培养系统的理论最大生物质产量。由此可见,即使所有培养条件都完全理想,此培养系统也无法达到产油转换点,这是原生产方案无法产出高含油量微藻的根本原因。

如果通过降低氮供应量的方法降低产油转换点,对于藻液高度35 cm的露天跑道池,氮供应量应降低到改良f/2培养基的1/4(此时产油转换点在 OD_{750} 为1.25~1.38)。但是氮供应量降低也会降低培养系统内微藻生长速率。由于工程现场环境露天,温度、天气、通入培养系统的电厂烟气 CO_2 浓度无法保持稳定,总体培养条件不确定,不能进行准确的模拟计算,因此尽量选取近似营养条件,对微藻的生长速率进行估算。对营养不足(氮供应量为改良f/2培养基的1/4,简称1/4改良培养基;氮供应量为改良f/2培养基的1/10,简称1/10改良培养基)条件下两种室外光生物反应器微藻生长速率进行估算,结果如图2所示。



质停止继续增长时,微藻早已进入油脂积累阶段,若此时将该培养系统中的微藻采收,可以得到高含油量的藻粉。因此,在系统氮供应量处于改良f/2培养基的1/10~1/4之间,尤其是接近1/10时,通过大规模培养稳定收获高含油量微藻理论上可行。

由图2b可知,在营养充足时,横管培养系统的理论最大生物质产量 OD_{750} 为3.1,之后生物质产量难以继续增长。而在营养不足时,微藻生长速率在 OD_{750} 为2.0时基本为0。因此,尽管横管培养系统理论上具备了收获高含油量微藻的基本条件,但是较强的光照条件会导致光反应动力势阈值的抬升,进而造成实际生物质产量下降,因此在实际使用横

管培养系统培养高含油量微藻时,应适当调整培养基中氮供应量以更早到达产油转换点。

2.5 工业规模跑道池及横管式反应器的微藻生长及含油量测试

为了验证模型计算结果,制定如下实验方案进行验证,实验周期为 8 d,具体实验方案和结果见表 1。

在实验过程中,跑道池培养系统使用最大烟气流量,其中 CO₂ 体积分数为 10% ~ 12%。横管培养系统的通气流量及浓度根据碳消耗情况灵活调整,

通入气体中电厂烟气体积占比尽量控制在 15% ~ 30% 之间。在白天持续通入烟气,夜间关闭气阀停止通气。根据预测结果,在 P1、P2 跑道池中,P1 成功生产高含油量微藻,P2 藻粉含油量较低。在 5 组横管培养系统中,G4 无法产出高含油量微藻,G1、G2、G3、G5 这 4 组处于临界范围内,可能产出高含油量微藻。但在工程条件下,微藻生长受环境影响较大,因此在某一个具体的培养周期内,产出的藻粉品质存在波动。

表 1 实验验证方案及结果预测
Table 1 Experimental validation scheme and prediction of results

编号	光反应器类型	藻种	实验方案	最大理论生物质产量(OD ₇₅₀)	预测的产油转换点(OD ₇₅₀)	预测的生物物质产量(OD ₇₅₀)
P1	跑道池 26	当地藻种	氮供应量为改良 f/2 培养基的 1/9,藻液高度 15 cm	3.31	0.56 ~ 0.61	1.0
P2	跑道池 30	当地藻种	改良 f/2 培养基,藻液高度 15 cm		5.0 ~ 5.5	<3.31
G1	横管式反应器 1	当地藻种	标准培养基(氮供应量为改良 f/2 培养基的 1/3,磷供应量为改良 f/2 培养基的 1/5),无其他大量及微量元素补充,无维生素	>8	1.67 ~ 1.83	2.0
G2	横管式反应器 2	当地藻种	氮供应量为改良 f/2 培养基的 1/3		1.67 ~ 1.83	2.0
G3	横管式反应器 3	当地藻种	氮供应量为改良 f/2 培养基的 1/2		2.5 ~ 2.75	2.0 ~ 3.1 (约 2.6)
G4	横管式反应器 4	当地藻种	改良 f/2 培养基		5.0 ~ 5.5	<3.1
G5	横管式反应器 5	实验室野生藻种	接种到室外之前一直在温室内扩种,培养基配方同 G3		2.5 ~ 2.75	2.0 ~ 3.1 (约 2.6)

不同反应器培养高含油量微藻的生长曲线(采用紫外分光光度计测定藻液 OD₇₅₀)、生长过程中 pH(采用便携式酸度计检测)和含油量(参考文献[10-11]的方法提取油脂并计算含油量)的实验

证结果如图 3 所示。由于工业培养环境较为恶劣,部分实验组的培养条件严重缺乏营养,因此有些实验组在 7 d 时就结束了培养过程。

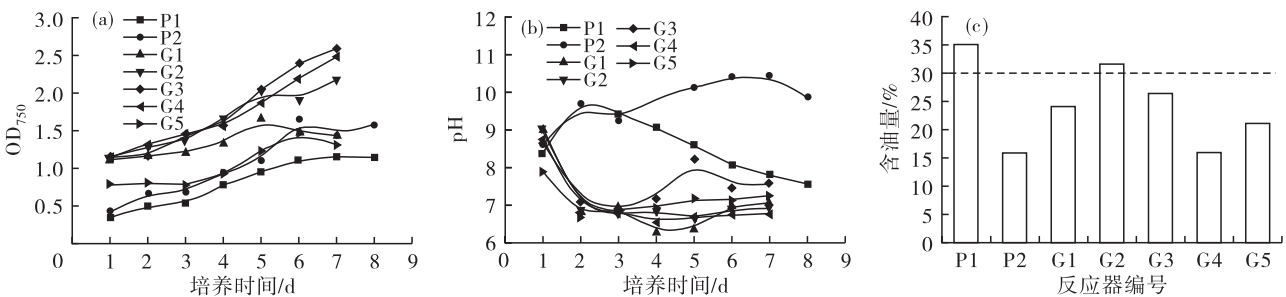


图 3 不同反应器培养高含油量微藻的生长曲线、生长过程中 pH 和含油量

Fig.3 Growth curves, pH and oil content during growth of microalgae with high oil content cultured in different reactors

由图 3a 可知,P1、G1 组在培养几天后生物物质产量已经基本保持稳定。P1 组的实际生物物质产量和

模型计算得到的生物物质产量非常接近,而 G1 组的实际生物物质产量低于用 1/4 改良培养基估算的生物

质产量。这可能是因为 G1 组的缺乏营养盐方案比预测时使用的营养盐方案效果更差,严重缺磷的同时完全缺乏各类大量及微量元素。G2 组的实际生物质产量高于预测值,这是因为该实验组营养条件优于 1/4 改良培养基。G3 组的实际生物质产量与预测值十分接近,而与 G3 组营养条件相同的 G5 组在培养 7 d 后实际生物质产量仍未达到预测值,这可能是由于接种浓度过低,且该藻种一直在温室内扩种,未在户外横管式反应器中培养过,因此需较长时间适应环境,实验结束时 OD_{750} 仍距预测值还有较大差距。在工程现场,这种花费较长时间也未能达到模型预测生物质产量的现象比较常见,这是因为使用模型估算生物质产量和生长速率时,按照当地晴天光照条件模拟,但在实际工程现场,阴天、下雨等不理想天气情况较多,严重减缓了实际生长速率,同时造成部分实验组的生长曲线产生波动。即使工程条件影响因素较多,此工程验证实验中获得生物质产量均未超过模型预测理论最大生物质产量,说明此模型预测结果严格。

培养系统中 CO_2 的溶解与微藻对 CO_2 固定的相对反应强度将会体现在藻液 pH 上,因此可通过藻液 pH 监测微藻生长阶段和稳定性。由图 3b 可知, P1 组最早达到生长速率峰值,表明其最早进入平台期积累油脂,而 P2 组直到实验结束也未进入平台期。与之相对的,横管培养系统由于反应器特点和曝气方式, CO_2 溶解量远超跑道池培养系统,因此其 pH 变化曲线形状与跑道池培养系统的有显著差异。其中 G3 组的 pH 回升最快,表明其碳元素积累速度最快。

由图 3c 可知,实验中实际收获藻粉中含油量与预测结果吻合。其中,理论预测中完全不可能产出高含油量藻粉的 P2 和 G4 两组,实际藻粉含油量均在 18% 以下,不能用于生物柴油生产。而预测能够产出高含油量藻粉的 P1 组,藻粉含油量最高,达到 35%,满足生产需求。而在预测中处于临界状态的 G1、G2、G3、G5 组,其藻粉含油量与 30% 标准线的差距与产油转换点和采收时生物质产量之间的差距呈正相关。G2 组因营养条件好于 G1 组,其生物质产量成功越过预测的产油转换点,藻粉含油量达 31.6%。G3 组生物质产量逼近产油转换点,但在跨越该转化点之前,实验周期已经结束,因此该组藻粉含油量稍差,但也达到 26.4%。G1 组和 G5 组由于前述分析的原因,采收时生物质产量低于产油转换点,因此含油量只有 20% ~ 25%。

综上,P1 组(以跑道池 26 为光反应器,藻液高

度 15 cm,氮供应量为改良 f/2 培养基的 1/9)的预测生物质产量大幅越过预测产油转换点,在实验中可以稳定生产高含油量藻粉,因此该方案为最佳方案。

3 结 论

本文基于一种全新 f_2 估测方法和最大生物质产量的理论模型,分析探讨大型工业光生物反应器生产高含油量微拟球藻的技术难题以及改进措施,提出一种低成本优化微藻生物质产量和含油量的工业实用方法,其中在以跑道池 26 为光生物反应器,藻液高度 15 cm,氮供应量为改良 f/2 培养基的 1/9 条件下,成功快速生产出数百吨含油量大于 30% 的微拟球藻粉,将理论模型在大型产业工程中得到有效验证和实际应用。

参考文献:

- [1] SUN H, ZHAO W, MAO X, et al. High - value biomass from microalgae production platforms: Strategies and progress based on carbon metabolism and energy conversion [J/OL]. *Biotechnol Biofuels*, 2018, 11: 227 [2024 - 07 - 18]. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1225-6>.
- [2] SAKARIKA M, KORNAROS M. Effect of pH on growth and lipid accumulation kinetics of the microalga *Chlorella vulgaris* grown heterotrophically under sulfur limitation[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 219: 694 - 701.
- [3] YAN C, ZHU L, WANG Y. Photosynthetic CO_2 uptake by microalgae for biogas upgrading and simultaneously biogas slurry decontamination by using of microalgae photobioreactor under various light wavelengths, light intensities, and photoperiods[J]. *Appl Energy*, 2016, 178: 9 - 18.
- [4] BILANOVIC D, ANDARGATCHEW A, KROEGER T, et al. Freshwater and marine microalgae sequestering of CO_2 at different C and N concentrations - response surface methodology analysis[J]. *Energy Convers Manag*, 2009, 50(2): 262 - 267.
- [5] TAN S T, BALASUBRAMANIAN R K, DAS P, et al. Application of mid - infrared chemical imaging and multivariate chemometrics analyses to characterise a population of microalgae cells [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 134: 316 - 323.
- [6] SCHNEIDER N, FORTIN T J, SPAN R, et al. Thermophysical properties of the marine microalgae *Nannochloropsis salina* [J]. *Fuel Process Technol*, 2016, 152: 390 - 398.
- [7] GIRALDO - ZULUAGA J H, SALAZAR A, DIEZ G, et al. Automatic identification of *Scenedesmus* polymorphic microalgae from microscopic images [J]. *Pattern Anal Appl*, 2018, 21(2): 601 - 612.

(下转第 123 页)

- 用[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(5): 39–46.
- [16] 欧慧瑜, 吕道俊, 李瑞鹏, 等. 巴戟天和天麻复合物改善睡眠作用的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(10): 3199–3202.
- [17] 穆朝娟, 张涛. 天麻素对戊四氮致痫大鼠脑内血管的保护作用[J]. 实用医学杂志, 2009, 25(14): 2226–2229.
- [18] KIM S, CHEN J, CHENG T, et al. PubChem in 2021: New data content and improved web interfaces [J]. Nucleic Acids Res, 2021, 49(d1): D1388–D1395.
- [19] DAINA A, MICHELIN O, ZOETE V. SwissTargetPrediction: Updated data and new features for efficient prediction of protein targets of small molecules [J]. Nucleic Acids Res, 2019, 47(W1): W357–W364.
- [20] XU H Y, ZHANG Y Q, LIU Z M, et al. ETCM: An encyclopaedia of traditional Chinese medicine [J]. Nucleic Acids Res, 2019, 47(D1): D976–D982.
- [21] WU T, HU E, XU S, et al. ClusterProfiler 4.0: A universal enrichment tool for interpreting omics data [J/OL]. Innovation, 2021, 2(3): 100141 [2024–05–20]. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100141>.
- [22] RAPPAPORT N, TWIK M, PLASCHKES I, et al. MalaCards: An amalgamated human disease compendium with diverse clinical and genetic annotation and structured search[J]. Nucleic Acids Res, 2017, 45(d1): D877–D887.
- [23] AMBERGER J S, HAMOSH A. Searching online mendelian inheritance in man (OMIM): A knowledgebase of human genes and genetic phenotypes [J]. Curr Protoc Bioinformatics, 2017, 58: 1.2.1–1.2.12.
- [24] YANG H, ROBINSON P N, WANG K. Phenolyzer: Phenotype – based prioritization of candidate genes for human diseases[J]. Nat Methods, 2015, 12(9): 841–843.
- [25] BARDOU P, MARIETTE J, ESCUDIÉ F, et al. Jvenn: An interactive Venn diagram viewer [J/OL]. BMC Bioinform, 2014, 15: 293 [2024–05–20]. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-15-293>.
- [26] ANWAR F, ASHRAF M, BHANGER M I. Interprovenance variation in the composition of *Moringa oleifera* oilseeds from Pakistan[J]. J Am Oil Chem Soc, 2005, 82(1): 45–51.
- [27] YAMADERA W, INAGAWA K, CHIBA S, et al. Glycine ingestion improves subjective sleep quality in human volunteers, correlating with polysomnographic changes [J]. Sleep Biol Rhythms, 2007, 5(2): 126–131.
- [28] KALKMAN H O. Potential opposite roles of the extracellular signal – regulated kinase (ERK) pathway in autism spectrum and bipolar disorders [J]. Neurosci Biobehav Rev, 2012, 36(10): 2206–2213.
- [29] JI Q, LI S J, ZHAO J B, et al. Genetic and neural mechanisms of sleep disorders in children with autism spectrum disorder: A review[J/OL]. Front Psychiatry, 2023, 14: 1079683 [2024–05–20]. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2023.1079683>.
- [30] 朱丽云, 钟钰, 柳小莉, 等. 基于网络药理学研究当归挥发油治疗失眠的作用机制 [J]. 中成药, 2022, 44(3): 1000–1005.
- [31] DEN HOLLANDER B, VEENVLIET A R J, ROTHUIZEN – LINDENSCHOT M, et al. Evidence for effect of l – serine, a novel therapy for GRIN2B – related neurodevelopmental disorder[J/OL]. Mol Genet Metab, 2023, 138(3): 107523 [2024–05–20]. <https://doi.org/10.1016/j.ymgme.2023.107523>.
- [32] LAHTINEN A, HÄKKINEN A, PUTTONEN S, et al. Differential DNA methylation in recovery from shift work disorder[J/OL]. Sci Rep, 2021, 11(1): 2895 [2024–05–20]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82627-0>.
-
- (上接第 106 页)
- [8] WANG Y, JIANG Z, LAI Z, et al. The self – adaption capability of microalgal biofilm under different light intensities: Photosynthetic parameters and biofilm microstructures [J/OL]. Algal Res, 2021, 58: 102383 [2024–07–18]. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102383>.
- [9] WANG Z, CHENG J, GUO D, et al. A novel simulation calculation model based on photosynthetic electron transfer for microalgal growth prediction in any photobioreactor [J/OL]. Appl Energy, 2023, 334: 120713 [2024–07–18]. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120713>.
- [10] CHENG J, MAO Y, GUO H, et al. Synergistic and efficient catalysis over Brønsted acidic ionic liquid [BSO₃HMIIm] [HSO₄] – modified metal – organic framework (IRMOF – 3) for microalgal biodiesel production[J/OL]. Fuel, 2022, 322: 124217 [2024–07–18]. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124217>.
- [11] LAM M K, LEE K T. Immobilization as a feasible method to simplify the separation of microalgae from water for biodiesel production[J]. Chem Eng J, 2012, 191: 263–268.