

## 微藻培养过程综合测控系统的研制与试验

迟庆雷<sup>1,2</sup>, 王利存<sup>1,2</sup>, 汪丰海<sup>1,2</sup>, 于琪<sup>1,2</sup>

(1. 国投生物科技投资有限公司, 北京 100032; 2. 微藻生物能源与资源北京市重点实验室, 北京 100032)

**摘要** [目的]为提高微藻光生物反应器的培养参数控制能力,建立起先进、稳定的微藻培养测控系统,进而提高微藻生产产量和品质。[方法]通过分析微藻培养过程参数确定拟设计综合测控系统的监测参数和控制参数,设计并研制出通用型综合测控系统,开展完整批次的微藻培养测试。[结果]测控系统稳定运行,光照、温度、pH、溶解氧的变化趋势相互印证,叶绿素荧光参数和RGB谱很好地反映出微藻细胞光合系统的生理状态,系统测量的自动OD与干重都有很好的线性关系,可以直接反映微藻生长密度。[结论]微藻综合测控系统设计合理、运行稳定、自动化程度高,很好地反映了微藻生产过程中的状态和趋势,实现了微藻生产过程的可控培养。

**关键词** 微藻培养;光生物反应器;测控系统;培养试验

中图分类号 TP 273 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)21-0218-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.056



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Development and Test of Integrated Measurement and Control System for Microalgae Cultivation Process

CHI Qing-lei<sup>1,2</sup>, WANG Li-cun<sup>1,2</sup>, WANG Feng-hai<sup>1,2</sup> et al (1. SDIC Biotech Investment Co., Ltd., Beijing 100032; 2. Beijing Key Laboratory of Microalgae Bioenergy and Resources, Beijing 100032)

**Abstract** [Objective] In order to improve the culture parameter control ability of the microalgae photobioreactor, an advanced and stable microalgae culture measurement and control system has been established to improve the microalgae production yield and quality. [Method] Through analyzing the parameters of the microalgae cultivation process, the monitoring parameters and control parameters of the proposed integrated measurement and control system were defined, and a universal integrated measurement and control system was designed and developed. Then a complete microalgae cultivation test was carried out. [Result] The system was running stably, and the changing trends of light, temperature, pH and dissolved oxygen were mutually confirmed. The chlorophyll fluorescence parameters and RGB spectrum well reflected the physiological state of the microalgae cell photosynthesis system. The automatic OD measured by the system had a good linear relationship with the dry weight, which could directly reflect the growth density of microalgae. [Conclusion] The microalgae integrated measurement and control system has reasonable design, stable operation and high degree of automation, which well reflects the status and trend of the microalgae production process, and realizes the controllable cultivation of the microalgae production process.

**Key words** Microalgae culture; Photobioreactor; Measurement and control system; Culture experiment

微藻作为光合自养微生物,由于其光合作用效率高、细胞生长快、不占用耕地、可连续生产等优点,被认为是营养品、食品、医药、生物基化学品以及可持续生物质能源生产的原料来源<sup>[1-3]</sup>。微藻产业化应用的前提是获得低成本的微藻生物质原料,而其中的核心是精准可控的微藻大规模培养。光生物反应器是微藻培养的关键设备,微藻培养综合测控系统是光生物反应器的重要组成部分,先进、稳定的控制系统可以使藻类的生长环境保持在适合快速生长的最佳条件,从而达到藻类高效大规模培养的目的。

该研究通过分析微藻培养过程控制参数的需求,确定测控系统的监测参数和控制参数,不同于一般的以环境参数或部分生理参数研究,该研究将生产过程参数全部集成在一个系统中,并适用于各种类型的光生物反应器。以管道式光生物反应器作为被控对象,进行综合测控系统的设计、仪器仪表选型,研制出通用型综合测控系统;通过开展完整批次的微藻培养试验,对综合测控系统进行测试,通过数据分析,验证测控系统的可靠性和稳定性,实现微藻生产过程的可控培养。

## 1 微藻培养过程及测控参数

在微藻生产全产业链各环节中,藻种筛选是基础,规模

化培养是关键,应根据藻种适应的特定环境和获取的特定产物确定规模化培养方式。微藻的培养方式分为光自养、异养和混养。其中,光自养指的是微藻直接利用光能,固定大气中的二氧化碳进行生长,与其他方法相比具有能耗低的优势,是目前微藻规模化培养的主要方式<sup>[4]</sup>。光自养培养过程中,二氧化碳是主要碳源,其合理的浓度影响着藻生物量。氮浓度对微藻的培养效果也有显著影响,微藻必须摄取一定量的氮以满足生长需要,而过高的氮浓度又有可能导致藻细胞的分裂受到抑制,而在氮缺乏下的变化,发现其生长时间缩短,生物量总量降低,但脂质积累增多。

实现微藻大规模培养的关键是构建微藻生长的光生物反应器系统。光生物反应器是利用光源培养微藻的生物反应器,是实现规模化培养微藻的基础装置<sup>[5]</sup>。微藻的生长和目标产物的积累受到物理(光照、温度、剪切力)、化学(CO<sub>2</sub>、pH、溶解氧、氮磷硫和微量元素等营养物)、生物(生物质浓度、细胞生化组成、细胞形态、生理状态、光合作用效率、能量的生物利用率)等多方面因素的影响<sup>[6-7]</sup>。

结合微藻光合自养生长的需求和自动化技术的实现能力,该研究拟研制微藻培养过程综合测控系统(简称“测控系统”)的参数(包括监测参数和控制参数)。监测参数分为环境参数和生理参数,环境参数包括温度、光强、pH、溶解氧,生理参数包括光密度OD、生物质干重、叶绿素荧光、吸收光谱(RGB谱)。生理参数可以从不同角度反映微藻的生理

**基金项目** 北京市科技计划项目(Z141100000614011);国家开发投资公司资助项目“高效经济光生物反应器研发”。**作者简介** 迟庆雷(1981—),男,山东日照人,高级工程师,硕士,从事微藻全流程工艺与装备研究。**收稿日期** 2021-06-06

状态,OD 值反映了微藻细胞浓度,与微藻的生物质干重呈正相关;叶绿素荧光参数可以反映出微藻光合系统的活力状态;RGB 谱与微藻体内积累的色素有关,可以反映出微藻不同色素及代谢产物积累的变化。细胞生长主要依靠 OD 或叶绿素荧光光谱来表征,而细胞生长的控制主要通过调控二氧化碳供给和光强实现<sup>[8-9]</sup>,中国科学院过程工程研究所通过表征  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  浓度变化动力学与生物质成分的关系成功模拟了微藻在不同状态下的生物质成分变化<sup>[10]</sup>。系统控制参数包括二氧化碳调节量、降温冷却水量和电机变频参数。

## 2 测控系统设计与研制

### 2.1 系统设计

微藻培养过程综合测控系统的主要目标是通过嵌入式或可编程逻辑控制器技术实现温度、光强、pH、溶氧度、流量、OD、叶绿素荧光等参数的监测,以及对二氧化碳通气量、冷却水量、泵频率的控制。

基于对微藻培养特点的分析,兼顾兼容性和拓展性进行开发,测控系统由测定系统、运算控制单元、人机交互、控制执行单元和信息发布五大主要部分构成。如图 1 所示,各部分构成如下。

(1)测定系统。微藻培养过程中的环境参数和生理参数的测定。环境参数的测量由安装在光生物反应器的仪表进行测量,主要包括温度计、酸度计、流量计、光照度计、溶氧仪

等,所测得数据为连续测定。生理参数的测量仪器包括叶绿素荧光仪、分光光度计、RGB 光谱仪,通过自动在线取样进行测定,测量数据为批次测量。所测定的各项参数通过电信号输送到运算控制单元,对信号进行处理、显示和存储。

(2)运算控制单元。基于 PC 上位机的专用控制器,能够根据各个仪表采集的模拟信号,进行数字转化,在控制单元内进行解析计算,获得监测参数数据。根据设定的参数标准值,采用专用控制算法进行各参数的综合计算,获得控制参数输出值,用于控制各个执行器的执行。

(3)人机交互。人机交互采用 PC 上位机,控制软件的显示界面给出当前光生物反应器藻类生长的各变量状态值、历史曲线、报警,同时将数据存储在上位机内。

(4)控制执行单元。主要包括 pH 控制、温度控制和藻液流量控制 3 个部分。pH 通过控制质量流量计输送的二氧化碳流量进行调控,温度通过控制冷却水量进行调控,藻液流量通过变频器输出信号给电机控制泵的流量,使得各个变量控制到预先设定的数值范围内。

(5)信息发布。微藻培养过程各项参数通过 RS-485 通讯送入到 DCS 中央控制系统中,联合其他光生物反应器和上下游设备,实现微藻生产全流程控制,同时将数据发布到云端,实现在工厂内和全国各地不同网络终端查询和操作,提高微藻工厂的自动化和信息化水平。

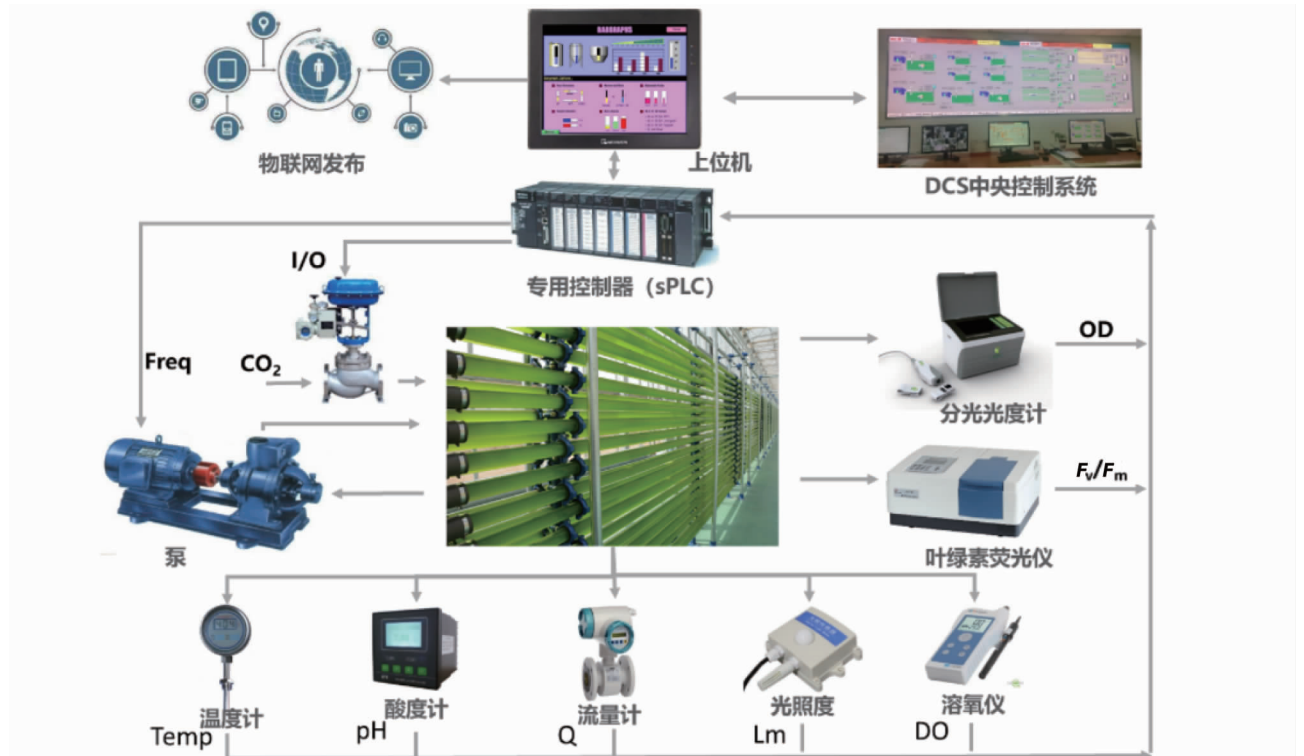


图 1 微藻培养综合测控系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of integrated measurement and control system for microalgae culture

### 2.2 系统参数与主要特点

微藻培养综合测控系统的目标是提供高兼容性的一体化微藻培养自控解决方案。该系统的主要设计参数见表 1。

基于测控系统的设计目标和参数要求,系统具有以下特

点:①高适配性,可以与目前已有的不同培养系统匹配使用,实现即插即用,不针对特定的反应器;②针对微藻培养特点的集成化微藻光学测定系统,包括 OD、叶绿素荧光、RGB 光谱,能够实现微藻培养过程中常用光学特征表征,具有自动



清洗功能;③测控结合,与现有系统主要依靠预先设定参数控制不同,能够实现真正的全参数反馈调控,可以根据试验设计自由设定。

表 1 微藻培养综合测控系统主要设计参数

Table 1 Main parameters of integrated measurement and control system for microalgae culture

项目 Item	监测 Monitoring	默认控制方式 Default control method
温度 Temperature	0~50 ℃, 2 个检测点	冷却水开关控制
光强 Light intensity	0~20 000 lx, 0~2 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	手动控制
CO <sub>2</sub>	0~20%	质量流量控制器
pH	4~10	二氧化碳流量
RGB 色彩 RGB color	R/G/B 三色吸收光谱	—
叶绿素荧光 Chlorophyll fluorescence	$F_0, F_m, F_v/F_m$	—
OD	0~5(680 nm)	—
dO <sub>2</sub>	0~200%	—
dCO <sub>2</sub>	$5.0 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^{-6}$ mol/L	—
光谱 Spectrum	400~800 nm	—
数据存储与控制 Data storage and control	SD 卡, PC 端软件	PC 端软件

**2.3 系统研制** 该研究以国投微藻中心的管道式光生物反应器为对象,反应器长度 60 m、高度 2.2 m,培养体积 10 t,依托该反应器安装各种仪表,成功搭建微藻培养过程测控系统。光生物反应器与测控系统如图 2 所示,软件系统界面如图 3 所示。

### 3 测控系统测试与数据分析

微藻综合测控系统完成调试后,以管道式光生物反应器为控制对象,以某栅藻种为培养藻种,在河北省廊坊市生产基地进行连续培养 16 d(2016 年 11 月 12—27 日)的完整批次的培养过程试验,系统运行正常,测控系统完整地记录下相关数据。

通过分析该批微藻培养的环境数据,从图 4 可以看出,整个培养过程中光照、温度、pH、溶解氧的变化趋势可以相互印证,表明整个测控系统运行稳定。如 11 月 13、17、18、20 日天气阴、光照差,相应温度较同期晴朗天气温度低。同时,因光照低,光合作用弱,溶解氧低,从 OD 的生长曲线上也可以看出,此期间微藻生长速率慢。相应地,在天气晴朗时,温度升高,溶解氧升高,OD 上升速度快,说明微藻生长速率快。



图 2 10 t 体积管道式光生物反应器(a)和微藻培养综合测控系统(b)

Fig. 2 10 t volume tubular photobioreactor(a) and integrated measurement and control system for microalgae cultivation (b)

通过分析该批微藻培养的自动测量 OD、叶绿素荧光参数和吸收光谱(RGB 谱)数据,从图 5 可以看出,①从自动 OD 的曲线数据分析,此批次微藻培养经历了藻种恢复阶段、快速生长阶段、平台期阶段、衰退阶段。②RGB 光谱显示,初期藻液颜色偏黄,与藻种缺氮培养有关。一般绿藻在缺氮时由于其蛋白合成受阻,能量会转向碳水化合物或其他色素,使藻细胞内叶绿素显色的比例降低,而呈现黄色。初期由于微藻缺氮和藻密度较低,其光合效率较低,并且在中午日照充足时出现光抑制。随着氮元素的添加及微藻状态的恢复,同时在 11 月 14—16 日光线充足,微藻出现了较快速的增长,随后的 11 月 17—18 日光线较差,增长放缓。③在培养的后期,虽然气温和光照均处于较好的水平,但由于微藻生

理状态变差,其 pH 上升和溶解氧的上升均变小。微藻的 OD、 $F_v/F_m$ 、 $F_m$ 、放氧量都呈下降趋势,RGB 值增加,藻液颜色变浅,而此时藻液颜色已经不再发黄。④整个培养过程中出现了 3 次快速生长期,分别是 11 月 14—16 日、19 日、23—27 日,这期间 OD、pH、溶解氧、RGB 曲线相互印证,这几段时间内其  $F_v/F_m$  值均大于 0.7 或在 0.7 附近,表明微藻的光合系统状态良好。

通过对测控系统自动测量 OD 与实验室手工测量 OD、干重进行比较,结果发现(图 6),自动测量 OD 与手工测量 OD 和干重都有很好的线性相关性, $R^2$  均达到 0.95。这充分证明在将自动测量 OD 与手工 OD 和干重校准后,建立自动测量 OD 和干重的回归方程,测控系统自动测量的 OD 数据

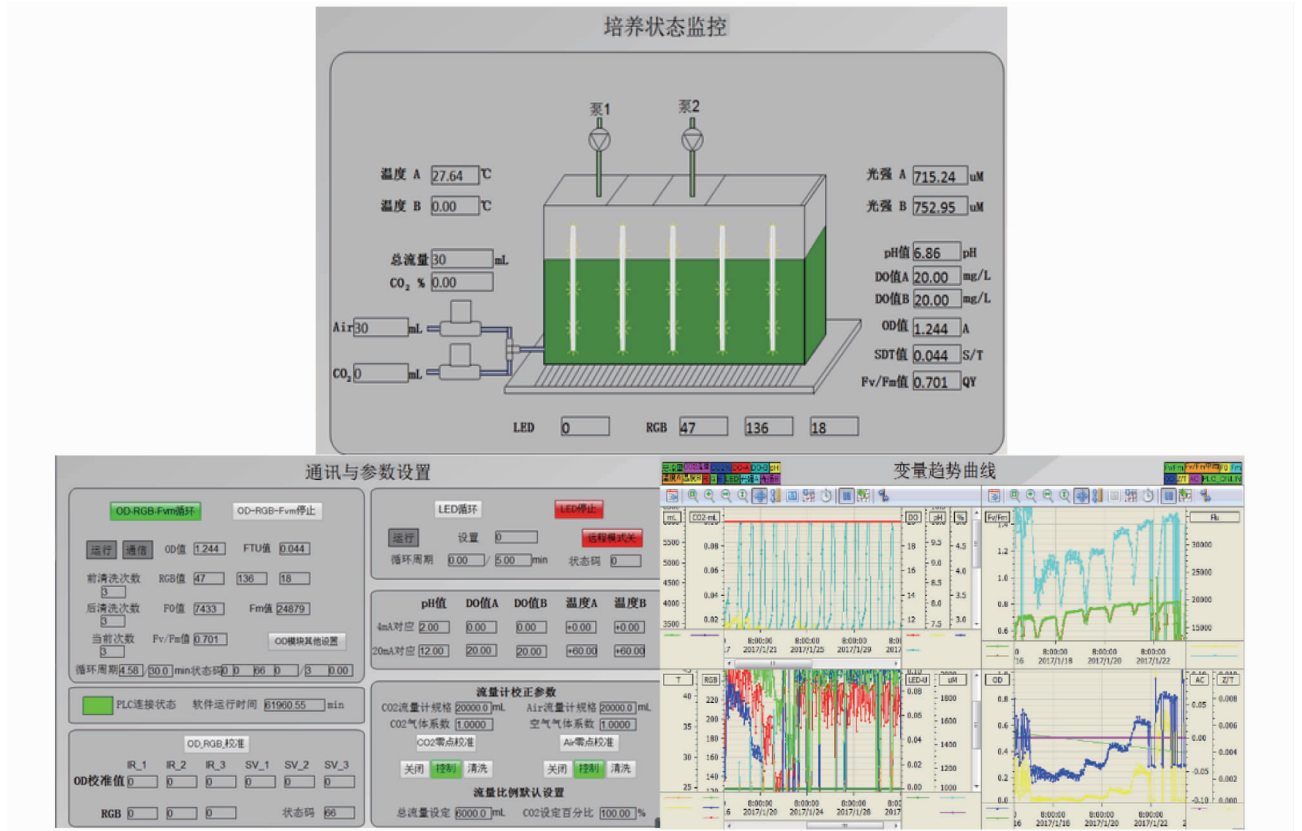


图3 微藻培养综合测控系统软件界面

Fig. 3 Software interface of the integrated measurement and control system for microalgae cultivation

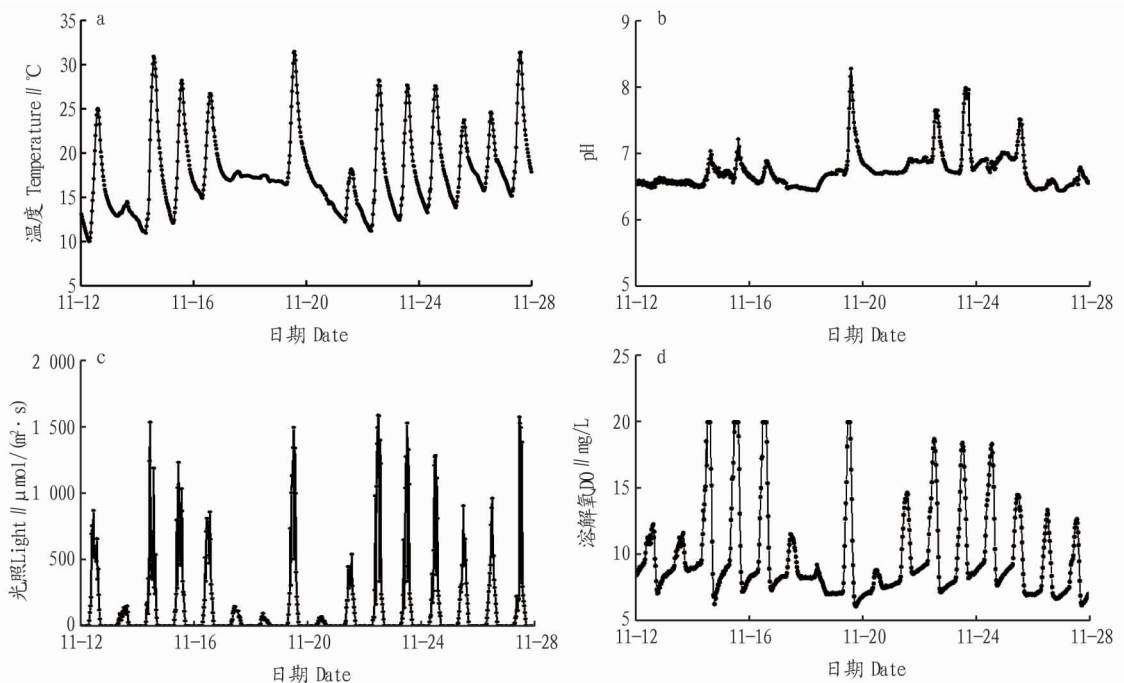


图4 2016年11月12—27日栅藻培养过程温度(a)、pH(b)、光照(c)、溶解氧(d)变化

Fig. 4 Changes of temperature (a), pH (b), light (c) and dissolved oxygen (d) during the culture process of *Scenedesmus* on November 12–27, 2016

很好地反映出整个培养过程中的生长密度信息。

#### 4 讨论与结论

通过对微藻培养生长过程分析,确立了微藻综合测控系统的监测参数和控制参数,对检测仪表、控制器等硬件进行

选型、集成,完成系统的研制和调试。以管道式光生物反应器为控制对象,成功开发通用型微藻培养综合测控系统,并开展了完整批次的微藻培养过程监控与控制。测试结果表明,整个测控系统运行稳定,整个培养过程中成功实现了各

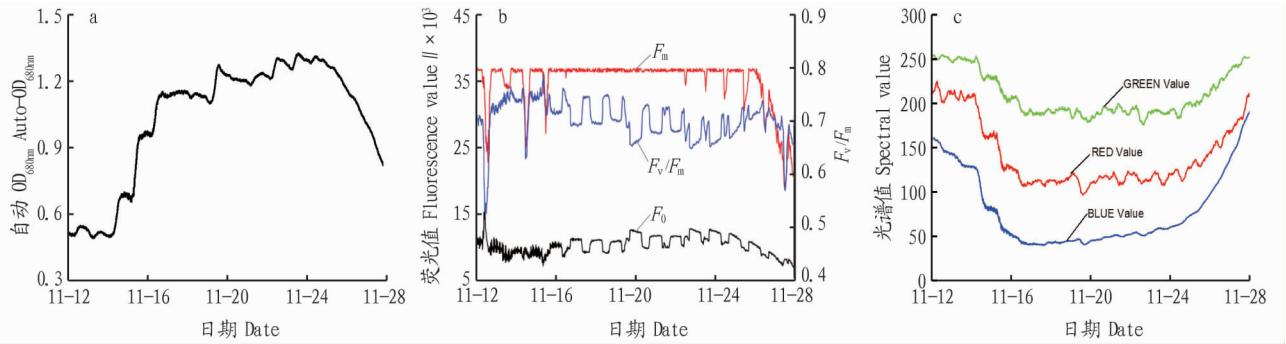


图5 2016年11月12—27日栅藻培养过程自动测量OD(a)、叶绿素荧光参数(b)、RGB谱(c)

Fig. 5 Auto-OD (a), chlorophyll fluorescence parameters (b) and RGB spectrum (c) of *Scenedesmus* culture on November 12–27, 2016

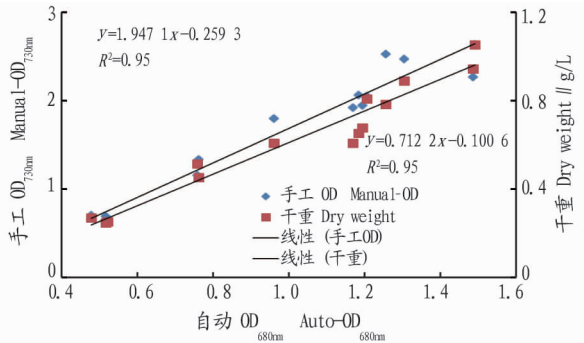


图6 自动测量OD与手工测量OD、干重的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between auto-OD, manual-OD and dry weight

个环境参数和生理参数的监测,光照、温度、pH、溶解氧的变化趋势可以相互印证;叶绿素荧光参数和RGB谱可以很好地反映出微藻细胞光合系统的生理状态;系统测量的自动OD与手工测量OD、干重都有很好的线性相关性,可以直接反馈微藻生长密度。总的来说,微藻综合测控系统设计合理,自动化程度高,很好地反映了微藻生产过程中的状态和趋势,有助于提高微藻培养过程的自动化、信息化和智能化

水平。

## 参考文献

- [1] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae[J]. *Biotechnology advances*, 2007, 25(3): 294–306.
- [2] MASOJÍDEK J, KOPECKÝ J, GIANNELLI L, et al. Productivity correlated to photobiochemical performance of *Chlorella* mass cultures grown outdoors in thin-layer cascades[J]. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 2011, 38(2): 307–317.
- [3] 李元广, 谭天伟, 黄英明. 微藻生物柴油产业化技术中的若干科学问题及其分析[J]. *中国基础科学*, 2009, 11(5): 64–70.
- [4] 吕旭, 孙仁旺, 张红兵. 微藻规模化培养技术研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(6): 1487–1490.
- [5] 马国杰, 常春, 孙绍辉. 能源微藻规模化培养影响因素的研究进展[J]. *化工进展*, 2019, 38(12): 5323–5329.
- [6] HAVLIK I, LINDNER P, SCHEPER T, et al. On-line monitoring of large cultivations of microalgae and cyanobacteria[J]. *Trends in biotechnology*, 2013, 31(7): 406–414.
- [7] 徐年军, 张学成. 温度、光照、pH值对后棘藻生长及脂肪酸含量的影响[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2001, 31(4): 541–547.
- [8] 张文蕾, 佟少明, 侯和胜. 利用叶绿素荧光监测微藻的生长及生理状态[J]. *激光生物学报*, 2016, 25(1): 48–55.
- [9] 王金辉, 蔡强, 徐勤利. 基于微藻培养的OD在线检测系统[J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21(8): 2061–2064.
- [10] ZHANG D M, YAN F, SUN Z L, et al. On-line modeling intracellular carbon and energy metabolism of *Nannochloropsis* sp. in nitrogen-repletion and nitrogen-limitation cultures[J]. *Bioresource technology*, 2014, 164: 86–92.

(上接第201页)

油提取工艺条件进行了优化。结果表明,水蒸气蒸馏法提取山苍子精油的最佳工艺条件:料液比1:10(g:mL),NaCl浓度2%,蒸馏时间2h。在该工艺条件下,山苍子枝叶中精油的提取率为2.366%。各因素中对山苍子精油提取率影响最大的是料液比,其次是蒸馏时间,NaCl浓度的影响最小。

山苍子对生长环境适应性强,枝条和叶子生长速度快,在不加管理的情况下仍能长到2m左右,产量大,因此其可利用的资源极为丰富<sup>[10]</sup>。水蒸气蒸馏法提取山苍子精油,工艺简单,无需大型设备投入,适合在农村地区推广。该研究以水蒸气蒸馏法提取山苍子精油,优化了其工艺条件,可为山苍子植物资源的开发利用提供理论参考。

## 参考文献

- [1] 覃忠革, 何佳静, 黄德积, 等. 连山县山苍子丰产造林总结[J]. *现代农*

业科技, 2017(8): 154, 158.

- [2] 徐佑明, 唐忠平, 周仁飞. 山苍子优良种质资源选择及丰产栽培技术[J]. *衡阳市师范学院学报*, 2016, 37(6): 112–114.
- [3] 徐华聪, 杜一新. 山苍子资源保护及人工栽培技术[J]. *世界热带农业信息*, 2015(2): 7–10.
- [4] 薛海军, 肖艳辉, 何金明. 山苍子的特征特性及其利用[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(19): 10057–10058.
- [5] 肖正春, 张广伦, 张卫明. 山苍子民族植物学的初步研究[J]. *中国野生植物资源*, 2014, 33(4): 34–35, 71.
- [6] 王旭, 杨关锋. 我国山苍子开发利用的现状与发展对策[J]. *经济林研究*, 2010, 28(3): 136–139.
- [7] 刘晓棠, 张卫明, 张政. 山苍子资源开发利用的研究[J]. *中国野生植物资源*, 2008, 27(4): 20–22, 28.
- [8] 彭湘莲, 付红军. 山苍子精油的提取及其抑菌研究现状[J]. *林产工业*, 2018, 45(11): 51–54.
- [9] 高宏建, 张献忠, 钟建军, 等. 水蒸气蒸馏法提取烟草精油的研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(10): 388–390.
- [10] 钟东洋, 钟文静. 浅谈山苍子的利用与产业化开发措施[J]. *科技信息(科学教研)*, 2008(25): 363.