

Novel method of buoy-bead flotation for harvesting micro-algae and its performance

Xiaotong ZOU¹, Kaiwei XU¹, Hao WEN¹, Xiangying REN¹, Zhou SHEN¹, Yanpeng LI^{1,2,3*}

1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China

3. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract: Buoy-bead flotation (BBF) technology used low density hollow microspheres instead of air bubbles to harvest microalgae with high efficiency and low energy consume. *Chlorella vulgaris* (common energy microalgae) and sodium borosilicate glass microspheres were chosen as experimental microalgae and cenospheres in BBF process. BBF method was compared with traditional dissolved air flotation method. Response surface methodology was used to optimize the process of BBF method. The results showed that the flotation rate with sodium borosilicate was ideal. Microspheres particle size, concentration and stirring speed had significant influence on flotation rate. The rate could be 83.7% under the conditions of particle size 56 μm , particle concentration 0.546 g/L and stirring speed 133 r/min.

Key words: biodiesel; energy microalgae; buoy-bead flotation; harvesting

能源微藻无泡采收新方法及其性能

邹小彤¹, 徐开伟¹, 文豪¹, 任香莹¹, 沈洲¹, 李彦鹏^{1,2,3*}

1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054

2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054

3. 陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安 710054

摘 要: 采用低密度浮珠颗粒代替气泡的无泡采收方法, 高效低成本采收能源微藻。以常见能源微藻小球藻为例, 以硅硼酸钠为浮珠, 比较了浮珠浮选工艺与传统气浮法的区别, 通过响应面法优化了浮珠浮选工艺。结果表明, 以硅硼酸钠为浮珠的无泡采收效果较理想, 浮珠颗粒粒径、浓度和搅拌速率对采收率影响显著, 颗粒直径 56 μm 、浓度 0.546 g/L、搅拌速率 133 r/min 的条件下采收率最好, 达 83.7%。

关键词: 生物柴油; 能源微藻; 浮珠浮选; 采收

中图分类号: TQ028

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2018)04-0872-07

1 前言

随着全球人口增长和人们生活、消费水平的提高, 化石能源消耗大幅增加, 开发可替代化石能源的新能源是目前的研究热点^[1]。微藻提炼的生物柴油被认为是最

有前景的可再生绿色能源之一, 其中采收环节至关重要, 高效便捷、经济环保直接决定了能源微藻炼油的商业化^[2]。

气浮法(DAF)相较于传统的离心、膜过滤、电解等采收方法, 具有快速、高效的优势, 易大规模产业化应

收稿: 2017-10-27, 修回: 2017-12-25, 网络发表: 2018-06-11, Received: 2017-10-27, Revised: 2017-12-25, Published online: 2018-06-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51478045); 陕西省自然科学基金资助项目(编号: 2017JM5054); 中央高校基本科研业务费专项(编号: 310829163406, 310829172001, 310831161007); 陕西省土地整治重点实验室开放基金资助项目(编号: 2018-ZD04)

作者简介: 邹小彤(1993-), 女, 四川省重庆市人, 硕士研究生, 环境工程专业, Tel: 13259935822, E-mail: 277958214@qq.com; 李彦鹏, 通讯联系人, Tel: 029-82339991, E-mail: liyanp01@chd.edu.cn.

引用格式: 邹小彤, 徐开伟, 文豪, 等. 能源微藻无泡采收新方法及其性能. 过程工程学报, 2018, 18(4): 872-878.

Zou X T, Xu K W, Wen H, et al. Novel method of buoy-bead flotation for harvesting micro-algae and its performance (in Chinese).

Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 872-878, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217377.

用^[3]。此法将微气泡引入经絮凝预处理的藻液中, 与絮体结合, 利用结合体的浮力实现高效采收^[4,5]。根据经典气浮理论, 气浮总效率为气泡-颗粒碰撞、气泡-颗粒粘附和粘附颗粒脱附 3 个子过程的效率之积^[6]。其中, 气泡-颗粒碰撞效率主要取决于体系内的流体动力学特性, 相关研究最成熟, 也提出了很多理论模型。而对粘附与脱附过程的认识相对薄弱, 限制了气浮总效率进一步提高。近年来, 有研究者尝试从增强粘附过程角度开发新的浮选分离方法, 以期提高浮选效率。Toh 等^[7]设计了磁珠采收方式, 通过施加磁场使微藻与磁珠的结合体从溶液中分离, 从而达到高效低耗采收的目的。

借鉴这一思想, 本研究提出一种浮珠浮选法 (Buoy-bead Flotation, BBF), 用低密度浮珠 (Microsphere) 代替微气泡加入藻液中, 形成低密度的微藻-浮珠结合体。为了确定浮珠浮选工艺的最优采收率, 本研究采用响应面法 (Response Surface Methodology, RSM)^[8,9]对实验因素和结果进行拟合。以小球藻为例, 运用响应面软件对可能影响浮选过程的因素进行评价^[10], 选择对采收

率影响最显著的 3 个因素, 通过响应面优化 (Box Behnken Design, BBD) 设计得到优化组合。

2 材料与方法

2.1 藻种培养

FACHB-8 小球藻 (*Chlorella vulgaris*, 中国科学研究院水生生物研究所淡水藻种库) 置于装载 BG-11 培养基的光生物反应器 (上海光宇生物科技有限公司) 中培养, 温度 $25\pm1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照强度 $3000\sim3500\text{ Lux}$, 光暗周期 $12\text{ h}:12\text{ h}$, 空气流量 15 L/h , $\text{pH}=7\sim7.5$ 。取静止期小球藻, 用于浮珠浮选实验。

2.2 浮选分离实验

浮选实验参照 Hao 等^[11]的方法进行。图 1 为实验装置示意图。浮选设备主体为自制的直径 25 cm 、高 100 cm 的浮选柱, 选用空心硅硼酸钠玻璃珠代替传统气浮法中的微气泡。表 1 为所用 3 种浮珠 (型号 1025, 1040 和 1060) 的物理性质。测试发现, 浮珠的抗压性与软化点对浮选效果基本无影响。

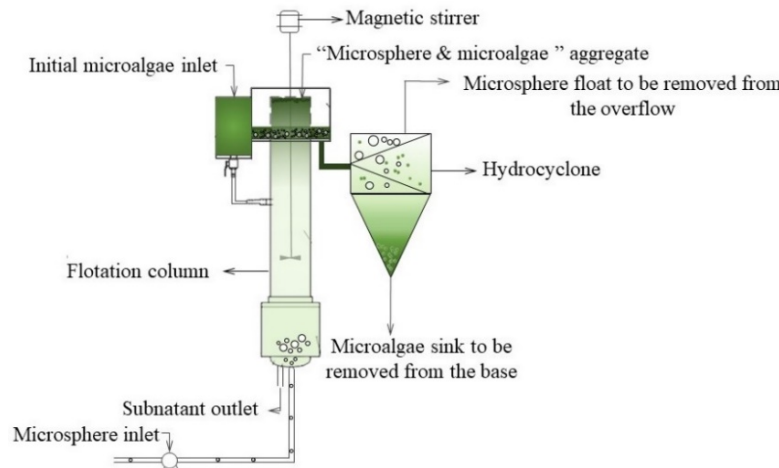


图 1 浮珠浮选装置图
Fig.1 Schematic of the buoy-bead flotation system

表 1 浮珠的物理性质
Table 1 The physical properties of the microsphere

Type	Density/ (g/cm ³)	Compression strength/MPa	Particle size of 90% cumulative distribution, $D_{90}/\mu\text{m}$	Particle size of 50% cumulative distribution, $D_{50}/\mu\text{m}$	Particle size of 10% cumulative distribution, $D_{10}/\mu\text{m}$	Softening point/ $^{\circ}\text{C}$
1025	0.25	5.17	95	78	35	600
1040	0.40	27.59	70	55	27	600
1060	0.60	55.17	54	40	15	600

浮珠使用前, 加入 100 mL 去离子水快速搅拌, 形成均匀分散体系。浮选实验前先进行预絮凝处理。在浮选柱 (2 L) 中先加入一定量絮凝剂 (茶皂素和壳聚糖的混合溶液, 用量见表 2), 将小球藻悬浮液加入浮选柱中, 用磁力搅拌器 (金坛市大地自动化仪器厂) 以 250 r/min 的转速快速搅拌 1 min , 静置 15 min , 使絮凝剂和小球

藻细胞充分接触。将制成的浮珠分散体系通过蠕动泵 [卡川尔流体科技 (上海) 有限公司] 注入浮选柱中。以一定速率搅拌, 静置一定时间 (搅拌速率与静止时间见表 2)。将分离出的浮珠-微藻结合体通入水力旋流器 (山东鑫海矿业技术设备有限公司) 中分离浮珠和微藻。用蠕动泵缓慢抽取浮选柱底部以上 5 cm 处的悬浮液体 10

mL. 用 DU720 紫外分光光度计(日本岛津公司)测定 540 nm 处的吸光度^[12], 采收率 $Y(\%)$ 计算公式如下:

$$Y=(1-C_0/C_1)\times 100\%, \tag{1}$$

式中, C_0 与 C_1 分别为浮选前后微藻的吸光度.

2.3 响应面优化方法

优化实验: 采收条件优化设计实验中, 将 Design Expert 8.0 软件随机生成的 8 种影响因素的高低值组合, 进行浮珠浮选实验. 用软件分析实验所得采收率(Y), 确定关键影响因子, 进行响应面优化实验, 通过最小二乘法拟合得采收率与关键影响因子方程.

(1) 影响因素的筛选: 通过 PBD (Plackett-Bueman Design)筛选实验确定关键影响因子. 8 种可能影响采收率的因素为搅拌速率(r/min)、颗粒浓度(mg/L)、浮珠粒径(μm)、pH、温度($^{\circ}\text{C}$)、浮选时间(min)、壳聚糖浓度(g/L)、茶皂素浓度(mg/L). 表 2 为 PBD 实验设计因素水平及其编码. 每种影响因素选取一个高水平(+1)与一个低水平(-1), 响应值为小球藻的采收率(Y).

表 2 PBD 实验设计因素水平及编码
Table 2 Coded levels and their actual associated values in the PBD design

Variable	Level	
	-1	+1
pH, x_1	6	9
Temperature $x_2/^{\circ}\text{C}$,	25	35
Microsphere diameter, $x_3/\mu\text{m}$	55	78
Microsphere concentration, $x_4/\text{g/L}$	0.2	0.4
Flotation time, x_5/min	2	4
Stirring rate, $x_6/(\text{r/min})$	30	200
Concentration of chitosan, $x_7/(\text{g/L})$	0.0	0.3
Concentration of tea saponin, $x_8/(\text{mg/L})$	0.0	80

(2) 响应面优化设计: 采用 BBD 设计(常用的响应面实验设计模式), 实验因素、编码及水平见表 3. 最小二乘法拟合二次多项方程如下:

$$Y = A_0 + \sum A_i X_i + \sum A_{ii} X_i^2 + \sum A_{ij} X_i X_j, \tag{2}$$

式中, Y 为响应值(采收率), A_{ii} , A_{ij} 为方程系数, X_i , $X_j(i \neq j)$ 为自变量编码值. 多项式模型方程拟合的性质由确定系数 R^2 表征, 其统计学上的显著性由 P 值检验. 通常取显著水平为 0.05, 即当 $P_{\text{Model}} < 0.05$ 时, 回归方程显著.

表 3 BBD 实验设计因素、编码及水平
Table 3 Factor levels and their actual associated values in the BBD tests

Factor	Level		
	-1	0	+1
Microsphere concentration, $X_1/(\text{g/L})$	0.4	0.55	0.7
Stirring rate, $X_2/(\text{r/min})$	30	115	200
Microsphere diameter, $X_3/\mu\text{m}$	40	55	78

3 结果与讨论

3.1 浮珠浮选采收率

图 2 为在不同 pH 下添加浮选药剂与不添加浮选药剂时, 浮珠浮选法(BBF)与气浮法(DAF)的采收率. 不添加药剂时, 浮珠浮选法的采收率比气浮法高 25.65%. 添加生物表面活性剂茶皂素时, 浮珠浮选法的采收率比气浮法高 9.59%, 添加茶皂素对浮珠浮选采收率的影响不明显. 相较于传统的气浮法, 浮珠浮选法既可避免添加化学药剂, 不影响下游产品, 不污染环境, 又不需产生气泡, 可节约 60%~80%的能量.

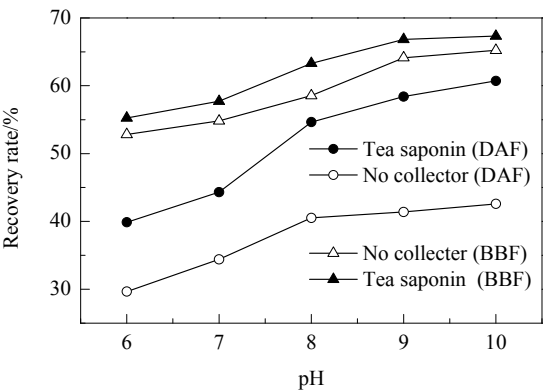


图 2 不同 pH 值下气浮法和浮珠浮选法的采收率
Fig.2 Recovery rate comparison of DAF and BBF with different pH values

3.2 响应面优化结果

为提高浮珠浮选的效率, 寻找合适的浮选条件, 采用响应面法对浮珠浮选工艺进行优化.

3.2.1 影响因素筛选

浮选条件对浮选结果影响显著. 本实验选择 pH、温度、浮珠粒径等 8 个因素, 加入 3 个虚拟变量(I, J, K), 进行变量 $n=11$ 的 PBD 实验. 将 11 个变量的高低值随机组合, 通过实验获得每种随机组合下的采收率. 表 4 为 PBD 实验的方差分析结果, 可见 $P_{\text{Model}}=0.0443 < 0.05$, 表明本实验模型显著. 相关系数 R^2 越大, 表明模型对实验结果拟合越好. 本模型 $R^2=96.32\%$, 表明在一次实验中仅有 3.68% 的概率会与实验预测不符. 根据贡献率, 选择对采收率影响显著的 3 个因素浮珠粒径、颗粒浓度和搅拌速率进一步进行 BBD 实验, 确定采收率 Y 的回归方程.

帕累托图表示各因素对实验的影响程度, 与正态概率图联用可筛选出对实验结果影响最显著的因素. 图 3(a)为帕累托图, 下端的水平黑色线代表对实验结果影

表 4 PBD 实验因素、水平及效应
Table 4 Assigned concentrations of variables at different levels and effect estimates in PBD test

Source	Effect value	Sum of squares	Contribution rate	F	P
Model	0.41	8	0.051	9.83	0.0433
pH, x_1	-0.12	0.044	10.26	8.37	0.063
Temperature, x_2	0.11	0.033	7.77	6.35	0.086
Microsphere's diameter, x_3	0.16	0.080	18.83	15.37	0.029
Microsphere's concentration, x_4	-0.16	0.081	19.08	15.57	0.029
Flotation time, x_5	0.090	0.024	5.67	4.63	0.121
Stirring rate, x_6	-0.21	0.13	30.86	25.19	0.015
Concentration of chitosan, x_7	-0.073	0.016	3.79	3.09	0.177
Concentration of tea saponin, x_8	-9.09×10^{-3}	2.656×10^{-4}	0.062	0.051	0.836

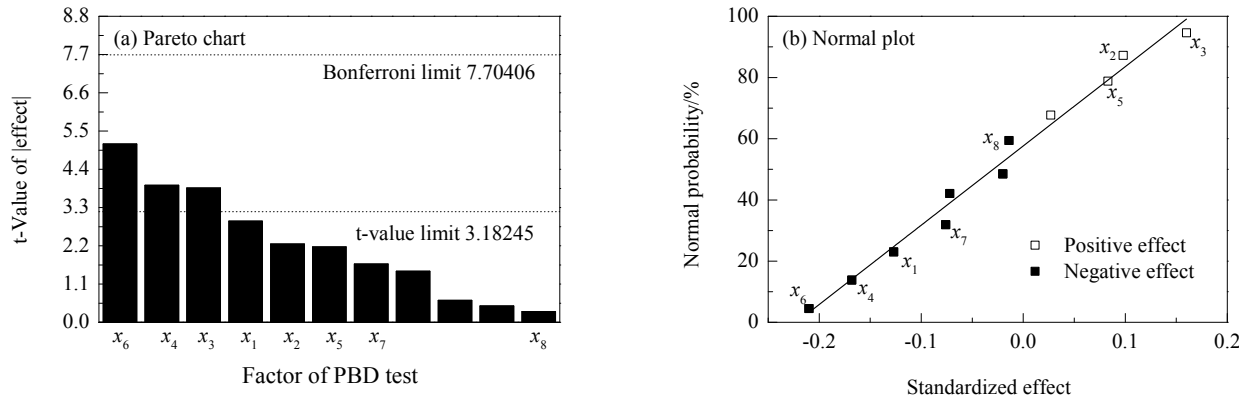


图 3 帕累托图和正态概率图
Fig.3 Pareto chart of the standardized effects gained and normal plot of the main effects

响水平超过 90%，超过黑色线的影响因素即为 PBD 实验筛选出的对浮珠浮选采收率影响最显著的 3 个因素。图 3(b)为正态概率图，用于确定影响因素对实验结果影响的大小和方向，通常认为分布在 0 左右的因素对采收率没有显著影响。从图可以看出，壳聚糖浓度(x_7)和茶皂素浓度(x_8)对采收率无显著影响。茶皂素为浮选剂，在传统气浮法中可提高气泡的停留时间，对采收率有显著影响。本实验用浮珠代替微气泡，不存在停留时间对实验结果的影响，所以茶皂素对采收率无明显影响。壳聚糖虽为絮凝剂，但在水溶液中溶解度很低，故对采收率也无显著影响。

图 4 为浮珠-小球藻结合体的显微镜图，在絮凝剂和表面活性剂作用不显著的情况下，浮珠大多通过表面粘附方式将小球藻带到液面上进行浮选。由于浮珠一次粘附的藻细胞不多(约 3~5 个)，且浮珠粒径(40~78 μm)远大于小球藻粒径(3~8 μm)，故浮珠粒径是影响微藻-浮珠絮体直径、密度的主要因素。在停止搅拌的上浮过程中，溶液的雷诺数 $Re < 2000$ ，为层流状态，可用斯托克斯定理[式(4)]解释絮体的上浮过程。浮珠的粒径越大，形成的絮体直径越大，且小球藻的密度(1.07 g/cm^3)^[13]与水的密度接近，故浮珠的密度越小，絮体与水的密度差越大。浮珠的粒径越大，密度越小，故当浮珠直径增大时，其上升速率增加，采收效率提高。

$$v = \frac{d_e^2/1(\rho_1 - \rho_0)g}{9\eta}, \quad (3)$$

式中， v 为上升速率(m/s)， d_e 为絮体的当量直径(m)， ρ_1 为絮体密度(g/cm^3)， ρ_0 为溶液的密度(g/cm^3)， g 为重力加速度(m/s^2)， η 为溶液的粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

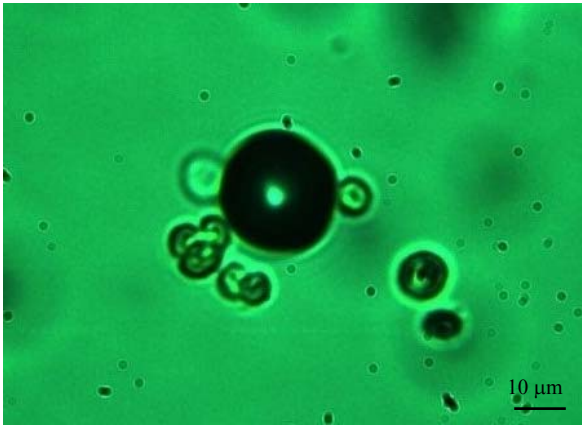


图 4 浮珠-小球藻结合体的显微镜图
Fig.4 Microscope image of microsphere- microalgae aggregate

3.2.2 关键因素优化

根据实验结果进行 BBD 实验回归分析，得回归方程[式(4)]， $R^2=0.9967$ 表明模型与实验值拟合较好，自变量与响应值之间线性关系显著^[14]。

$$Y=0.83+0.0007106X_1+0.035X_2+0.00995X_3-0.023X_1X_2-0.004417X_1X_3-0.071X_2X_3-0.062X_1^2-0.096X_2^2-0.20X_3^2. \quad (4)$$

拟项为 0.0978>0.05, 表明失拟项不显著^[15,16]. 因此回归方程可较好地预测浮珠浮选小球藻的采收率.

分析结果见表 5. $P<0.05$, 表明该模型回归显著. 失

Table 5 Assigned concentrations of variables at different levels and effect estimates in PBD test						
Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F	P	Significance
Model	0.26	9	0.028	231.76	<0.0001	*
X_1	3.999×10^{-6}	1	3.999×10^{-6}	0.033	0.8617	
X_2	9.510×10^{-4}	1	9.510×10^{-4}	77.68	<0.0001	*
X_3	7.992×10^{-4}	1	7.992×10^{-4}	6.53	0.0378	*
X_1X_2	2.039×10^{-3}	1	2.039×10^{-3}	16.66	0.0047	*
X_1X_3	7.883×10^{-5}	1	7.883×10^{-5}	0.64	0.4487	
X_2X_3	0.020	1	0.020	165.84	<0.0001	*
X_1^2	0.016	1	0.016	131.75	<0.0001	*
X_2^2	0.039	1	0.039	315.04	<0.0001	*
X_3^2	0.15	1	0.15	1249.57	<0.0001	*

Note: * was Significant. $R^2=0.9967$, $R_{adj}^2=0.9924$, $R_{pred}^2=0.9580$, adequate precision was 44.950.

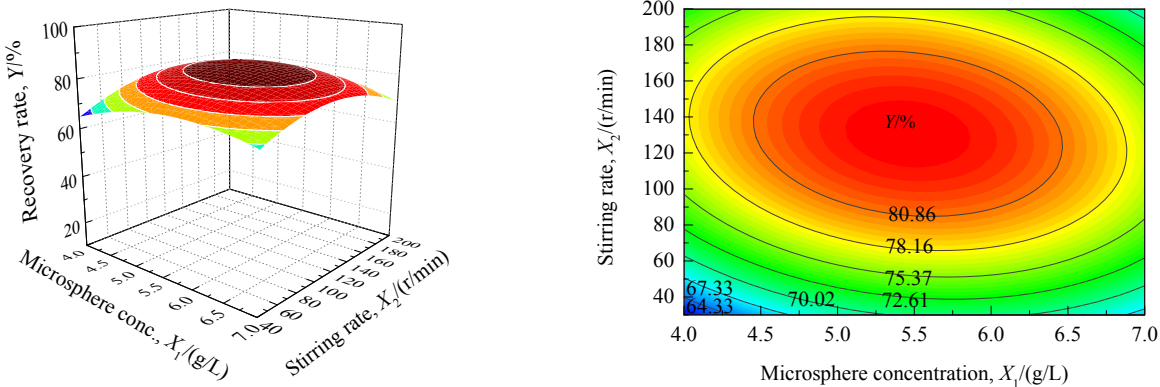


图 5 搅拌速率和颗粒浓度对采收率的影响
Fig.5 Effects of stirring rate and microsphere's concentration on harvest rate

3.2.3 响应面交互作用分析

为进一步考察颗粒浓度(X_1)、搅拌速度(X_2)、浮珠粒径(X_3)三个因素的交互作用并确定最优点, 根据式(4)绘制响应曲面图, 见图 5、6 和 7. 等高线图呈椭圆形或马鞍形时, 通常认为 2 个因素之间有一定的相互作用. 可以看出, 这 3 个因素两两之间有一定的相互作用.

图 5 为搅拌速率(X_2)和颗粒浓度(X_1)对采收率的影响. 可以看出, 浮珠颗粒的浓度过高或过低都不利于浮珠浮选工艺中小球藻的采收. 颗粒浓度过低, 降低了小球藻与浮珠接触的概率, 微藻-浮珠结合体数减少, 采收率无法升高; 随浮珠浓度增加, 浮珠与小球藻的碰撞概率增大, 结合体大量形成, 有助于采收率增加; 颗粒浓度过高, 小浮珠与大浮珠结合, 占据了浮珠表面与小球藻结合的位点, 不利于浮珠与小球藻结合.

图 6 为颗粒浓度(X_1)和浮珠粒径(X_3)对采收率的影响. 可以看出, 颗粒浓度一定时, 浮珠粒径过高或过低对小球藻的采收率均不利. 结合体的上升速度符合斯托克斯定理, 其密度与直径主要受浮珠自身性质的影响.

浮珠粒径过小, 则密度大, 结合体密度与水接近, 结合体直径小, 上升速率降低; 浮珠粒径过大, 则密度小, 浮珠的上升速率过快, 与小球藻没有充分的接触时间, 导致采收率降低. 因此最佳的浮珠粒径为 56 μm .

图 7 为搅拌速率(X_2)和浮珠粒径(X_3)对采收率的影响. 可以看出, 搅拌速率过高或过低均不利于微藻的采收. 原因是搅拌速率过低浮珠与微藻不能充分接触, 结合体减少; 搅拌速率过高会打散已经形成的絮体, 降低了采收率. 因此, 最佳搅拌速率为 115 r/min.

通过优化顶点分析, 得到模型的 3 个优化参数预测值分别为颗粒浓度 $X_1=0.546$ g/L、搅拌速率 $X_2=133$ r/min、粒径 $X_3=56$ μm , 预测的最大采收率为 83.7%.

3.3 模型验证

为验证模型的可靠性, 根据 PBD 优化结果, 结合 BBD 实验结果, 选择小球藻自然 pH、温度 35℃、粒径 56 μm 、颗粒浓度 0.546 g/L、浮选时间 2 min、搅拌速率 133 r/min, 该条件下小球藻的采收率为 85.4%, 与预测值接近, 表明该模型能很好地预测小球藻的采收率.

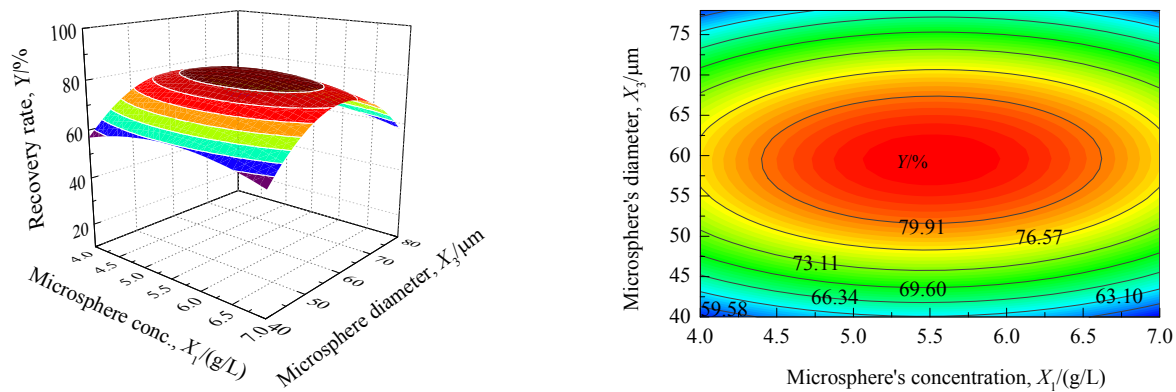


图 6 颗粒浓度和浮珠粒径对采收率的影响

Fig.6 Effects of microsphere's concentration and microsphere's diameter on harvest rate

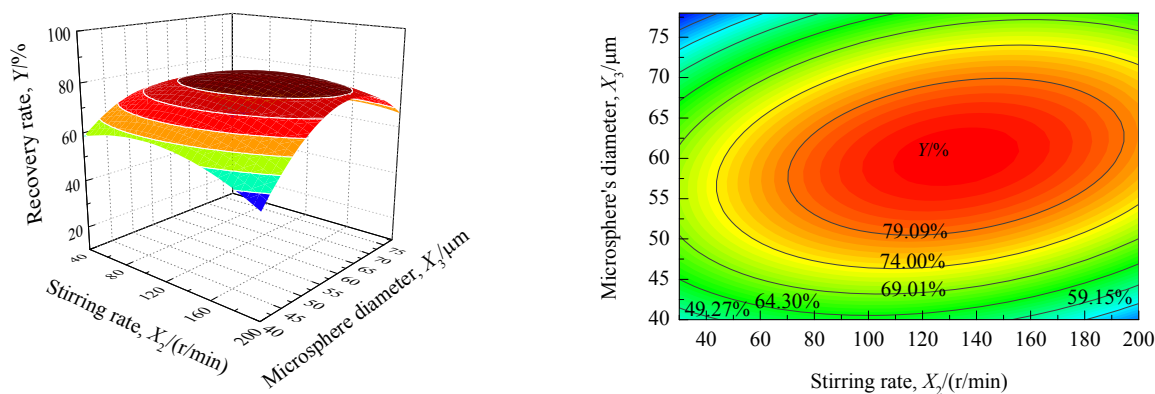


图 7 搅拌速率和浮珠粒径对采收率的影响

Fig.7 Effects of stirring rate and microsphere's diameter on harvest rate

表 6 各种采收工艺的能耗对比

Table 6 Comparison of energy consumption of various harvesting processes

Harvest technology	Energy consumption/(kW·h/m ³)	Harvest rate/%	Reference
Pressure filter	0.69	80	[17]
Vacuum filter	1.60	93	[18]
Electrolytic flocculation (Electrode separation=26 cm)	0.333	95	[19]
Decanter bowl centrifuge	8.00	78	[20]
Dissolved air flotation	7.34	92.4	This work
Buoy-bead flotation	0.144 (stir 0.019, separation 0.125)	85.4	This work

3.4 经济分析

用于微藻采收的工艺有多种,但都不能大规模应用,通常是因为采收率和经济性不能同时兼顾.表 6 对比了几种采收工艺的性能,离心法的采收率明显优于其它方法,但能耗相对较高,不适合大规模应用.而浮珠浮选工艺的能耗显著低于其它方法,浮选效率也较理想.

本实验中的浮珠浮选除能量消耗外,主要的经济投入为浮珠.浮珠价格为 25 元/500 g,传统浮选法中浮选剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)价格为 300 元/500 g,使用浓度分别为 0.5 和 0.08 g/L,可重复利用约 3~5 次.每浮选 1 L 藻液浮珠成本约 0.008 元,CTAB 成本约 0.048 元.故浮珠浮选可大大减少成本,是一种有前景、可大

规模应用的采收技术.

4 结 论

提出了一种新的微藻采收新方法—无泡浮珠浮选方法,采用响应面法进行了条件优化,比较了其与气浮法的采收效果,得到如下结论:

(1) 响应面优化后浮珠浮选的小球藻采收率可达 85.4%,且浮选过程不需加入化学药剂.

(2) 响应面模型优化的最佳浮选条件为小球藻自然 pH、温度 35℃、浮珠粒径 56 μm、浮珠浓度 0.546 g/L、浮选时间 2 min、搅拌速率 133 r/min,预测采收率为 83.7%.与实验值接近.

(3) 在保证采收率的前提下, 浮珠浮选工艺比传统气浮法节约了产生微气泡所需的能耗, 且浮珠的成本比传统浮选剂 CTAB 低, 具有更高的经济可行性。

参考文献

- [1] Kerr R A. Do we have the energy for the next transition [J]. *Science*, 2010, 329(5993): 780–781.
- [2] 夏金兰, 万民熙, 王润民, 等. 微藻生物柴油的现状与进展 [J]. *中国生物工程杂志*, 2009, 29(7): 118–126.
Xia J L, Wan M X, Wang R M, et al. Current status and progress of microalgal biodiesel [J]. *China Biotechnology*, 2009, 29(7): 118–126.
- [3] Christenson L, Sims R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts [J]. *Biotechnol. Adv.*, 2011, 29(6): 686–702.
- [4] Kwon H, Lu M, Lee E Y, et al. Harvesting of microalgae using flocculation combined with dissolved air flotation [J]. *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, 2014, 19(1): 143–149.
- [5] Zhao Y, Li Y P, Huang J, et al. Rebound and attachment involving single bubble and particle in the separation of plastics by froth flotation [J]. *Sep. Purif. Technol.*, 2015, 144: 123–132.
- [6] Ralston J, Fornasiero D, Hayes R. Bubble-particle attachment and detachment in flotation [J]. *Int. J. Miner. Process.*, 1999, 56(1): 133–164.
- [7] Toh P Y, Ng B W, Ahmad A L, et al. The role of particle-to-cell interactions in dictating nanoparticle aided magnetophoretic separation of microalgal cells [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(21): 12838–12848.
- [8] Tzikalos N, Belessi V, Lambropoulou D. Photocatalytic degradation of reactive red 195 using anatase/brookite TiO₂ mesoporous nanoparticles: optimization using response surface methodology (RSM) and kinetics studies [J]. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 2013, 20(4): 2305–2320.
- [9] Mubarak M, Shaija A, Suchithra T V. Optimization of lipid extraction from *salvinia molesta*, for biodiesel production using RSM and its fame analysis [J]. *Environ. Sci. Pollut. R.*, 2016, 23(14): 14047–14055.
- [10] 田洪源, 李瑞芳. 响应面法在生物过程优化中的应用 [J]. *食品工程*, 2010, (2): 8–11.
Tian Y Y, Li R F. Application of response surface method on biological process optimization [J]. *Food Engineering*, 2010, (2): 8–11.
- [11] Hao W, Yanpeng L, Zhou S, et al. Surface characteristics of microalgae and their effects on harvesting performance by air flotation [J]. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2017, 10(1): 125–133.
- [12] Garg S, Wang L, Schenk P M. Effective harvesting of low surface-hydrophobicity microalgae by froth flotation [J]. *Bioresour. Technol.*, 2014, 159: 437–441.
- [13] Henderson R, Sharp E, Jarvis P, et al. Identifying the linkage between particle characteristics and understanding coagulation performance [J]. *Water Sci. Tech. W. Sup.*, 2006, 6(1): 31–38.
- [14] Bezerra M A, Santelli R E, Oliveira E P, et al. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry [J]. *Talanta*, 2008, 76(5): 965–977.
- [15] 张彬, 谢明勇, 殷军艺, 等. 响应面分析法优化超声提取茶多糖工艺的研究 [J]. *食品科学*, 2008, 29(9): 234–238.
Zhang B, Xie M Y, Yin J Y, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction conditions of tea polysaccharides by using response surface methodology [J]. *Food Science*, 2008, 29(9): 234–238.
- [16] Wang Y, Wang S, Guo Y, et al. Oxidative degradation of lurgi coal gasification wastewater: optimization using response surface methodology [J]. *Environ. Prog. Sustain.*, 2015, 33(4): 1258–1265.
- [17] Molina G E, Belarbi E H, Ación Fernández F G, et al. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics [J]. *Biotechnol. Adv.*, 2003, 20(7): 491–515.
- [18] Coward T, Lee J G M, Caldwell G S. Development of a foam flotation system for harvesting microalgae biomass [J]. *Algal Res.*, 2013, 2(2): 135–144.
- [19] Lee A K, Lewis D M, Ashman P J. Harvesting of marine microalgae by electroflocculation: the energetics, plant design, and economics [J]. *Appl. Energy*, 2013, 108(8): 45–53.
- [20] Mohn F H. Experiences and strategies in the recovery of biomass from mass cultures of microalgae [J]. *Agris*, 1980, 11(1): 61–66.