

裂殖壶藻萃取油脂工艺的对比分析

彭 辉, 郝小红, 马 溢, 王亚兵

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以裂殖壶藻为原料, 分别以甲醇和乙醇作为携带剂, 通过索氏萃取法进行萃取对比, 得出最佳的携带剂, 然后进行超声波萃取。结果表明: 以乙醇为携带剂的萃取率更高, 索氏萃取微藻粗脂的最优条件(时间 8 h, 温度 100 ℃, 液固比 10 : 1)下可得最大萃取率为 30.5%; 以乙醇为携带剂, 超声波萃取的最优条件(时间 2 h, 温度 40 ℃, 液固比 120 : 1, 超声波功率 600 W)下可得最大萃取率为 53.5%。从微藻粗脂萃取率的角度来看, 超声波法优于索氏萃取法。

关键词: 裂殖壶藻; 正交实验; 索氏萃取; 超声萃取

中图分类号: TK 6

文献标志码: A

Comparative Analysis of the Extraction Technologies of Lipids from *Schizochytrium sp.*

PENG Hui, HAO Xiaohong, MA Yi, WANG Yabing

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: *Schizochytrium sp.* was used as raw material and methanol and ethanol were employed as carriers in this study. The Soxhlet method was adopted for extraction and comparison to obtain the most suitable carrier. Then, the ultrasonic method was used for investigating and comparing the rate of extraction. The results show that the extraction rate with ethanol as the carrier is higher. When using the Soxhlet extraction method, the maximum extraction rate is 30.5% under optimal conditions (time duration 8 h, temperature 100 ℃, liquid to solid ratio 10 : 1). When using the ultrasonic method, still with ethanol as the carrier, the maximum extraction rate is 53.5% under optimal conditions (time duration 2 h, temperature 40 ℃, liquid to solid ratio 120 : 1, ultrasonic power 600 W). It can be seen from the extraction rate of algae crude oil, the ultrasonic method is superior to the Soxhlet extraction.

Keywords: *schizochytrium sp.*; orthogonal experiment; Soxhlet extraction; ultrasonic extraction

随着石化能源的日益枯竭, 能源消耗已经成为了全球的严峻问题, 传统石化燃料在使用过程中带来的环境问题也迫使全球纷纷大力开发新能源。生物质能源是一种可再生的清洁能源, 其

中, 藻类由于生长周期短、易栽培、含油量高、不与农争地、生物量大、效率高并且光合作用强等优点逐渐作为大力研究的对象^[1]。同时藻类导致的水体富营养化问题也得到了解决, 达到变废为

收稿日期: 2017-11-18

第一作者: 彭 辉(1991-), 男, 硕士研究生。研究方向: 新能源科技研究。E-mail: hui_xiaopeng@163.com

通信作者: 郝小红(1975-), 女, 讲师。研究方向: 新能源科技研究。E-mail: haoxh@usst.edu.cn

宝的效果。在培养过程中能大量地吸收 CO₂，并且在使用微藻产生能量的同时又消耗 CO₂，有利于 CO₂ 减排，利用微藻油脂所制备的生物柴油不含硫，燃烧时不排放有毒气体，能有效缓解能源危机。

张锐等^[2]通过对影响油酯萃取效率的 4 个因素的考察和正交实验，得出美洲大蠊药渣残油的最佳萃取工艺条件：超声波功率 300 W，萃取时间 0.5 h，料液比 1：8，萃取次数 4 次，萃取率可达 24.25%。Viguera 等^[3]以原壳小球藻为原料，通过超临界 CO₂ 萃取，在压力 30 MPa，温度 70 ℃ 下的萃取率为 21%。Tang 等^[4]研究了裂殖壶藻通过超临界 CO₂ 萃取，用乙醇作为携带剂，通过萃取釜（32 mL）在实验条件（压力 35 MPa，温度 40 ℃，共溶剂添加量为 1：1）下，达到 33.9% 的萃取率。黄雄超^[5]以小球藻为原料，采用溶剂萃取法进行微藻油脂提取，选用超声辅助破壁预处理后，以二氯甲烷-甲醇（2：1）作为最适宜的萃取溶剂，在温度为 40 ℃，提取 6 h，可以得到的最高油脂萃取率为 24.11%。以上文献只考虑超声波或者超临界 CO₂ 单一的方法进行萃取，并没有采用多种方法对比来探索最高萃取效果。同时采用裂殖壶藻作为原料进行萃取的研究较少。本文以裂殖壶藻为原料，分别以甲醇和无水乙醇作为携带剂进行油脂萃取，确定最佳携带剂；随后，采用超声波法以乙醇作为携带剂进行微藻粗酯萃取，进而比较索氏萃取和超声波萃取两种萃取工艺，为今后的萃取工艺优化打好基础。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

实验所用原料为裂殖壶藻，由美国 Aquafauna Bio-Marine 公司生产。无水乙醇 AR（沪试）及甲醇 AR（沪试），由国药集团化学试剂有限公司提供。

1.2 实验仪器与设备

实验所需要的仪器与设备：电热恒温水浴锅（HHS11-1），上海贺德实验设备有限公司；电子天平（AL-20），梅特勒-托利多仪器有限公司；索氏萃取器，上海雄发仪器有限公司；聚能式超声逆流循环萃取设备（JYT-10LC），上海聚矩源机械设备有限公司；真空干燥箱（DZF-6090），上海一恒科学仪器有限公司。

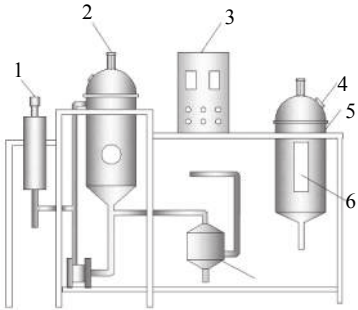
1.3 实验装置与操作步骤

索氏萃取法：将微藻置于温度为 60 ℃ 的恒温干燥箱中真空干燥 6 h 后备用。使用定性滤纸，折叠成滤纸筒，称量滤纸筒的质量并记录。称量一定量的微藻，置于滤纸筒中，并用棉线扎紧，防止实验过程微藻漏出。称量滤纸筒和微藻的总重。将盛放有微藻的滤纸筒放置于萃取管中，用量筒量取一定量的携带剂，加入提取管中。冷凝管中的冷凝水下进上出，一则冷凝水可以充满冷凝管，增大了换热面积；二则冷凝水可以在冷凝管中停留较长时间，延长了换热时间。当水浴锅中水的温度高于携带剂沸点时，携带剂蒸汽沿连接管经萃取管进入冷凝管中液化后，滴入萃取管中。当第一滴回流液滴下时开始计时，当萃取管中携带剂高于虹吸管时，携带剂由虹吸管流入烧瓶中，完成一次循环。待反应结束后，将微藻粗脂和携带剂的混合液置于蒸馏装置中进行蒸馏。

超声波萃取法：实验装置如图 1 所示。步骤如下：打开中央电控箱，接通电源；将滤纸安装至负压过滤器中；调整反应釜-超声波发生器阀门，使其开闭状态正确；将物料加入反应釜中，打开机械搅拌电机；先后打开空气压缩机、气动隔膜泵，并立即打开空气压缩机阀门开关；打开超声波发生器；调整阀门，将物料导入水冷分液罐中，打开离心泵；关闭空压机及其阀门，然后关闭气动隔膜泵；关闭离心泵，充分静置后，放出物料；对设备进行清洗，关闭电源；将水冷分液罐中的物料取出，经过滤、蒸馏、干燥后，得到微藻粗脂。微藻粗脂的萃取率由下式^[6]进行计算：

$$Y = \frac{M_e}{M} \times 100\% \tag{1}$$

式中：Y 为微藻萃取率，%；M_e 为萃取后的质量，g；M 为藻粉质量，g



1. 超声波发生器 2. 机械搅拌电机 3. 中央控制柜 4. 投料手孔
5. 水冷分液罐 6. 双玻璃视镜 7. 负压过滤器

图 1 超声波萃取装置

Fig.1 Ultrasonic extraction device

2 结果与讨论

2.1 索氏萃取

2.1.1 正交实验设计

a. 携带剂为甲醇, 根据文献[7-9]确定本实验的因素和水平数, 因素和水平如表 1 所示。

表 1 因素及水平分析 (携带剂为甲醇)

Tab.1 Factors and level analysis (carrier is methanol)

因素水平	A	B	C
	时间/h	温度/℃	液固比/(mL · g ⁻¹)
1	8	80	30 : 1
2	10	90	15 : 1
3	12	100	10 : 1

根据表 1 的实验因素, 设计正交实验, 得到的实验数据如表 2 所示。

表 2 正交实验方法及结果 (携带剂为甲醇)

Tab.2 Orthogonal test methods and results (carrier is methanol)

因素水平	A	B	C	萃取率/%
	时间/h	温度/℃	液固比/(mL · g ⁻¹)	
1	1	1	1	14.989
2	1	2	2	18.705
3	1	3	3	14.317
4	2	1	2	16.733
5	2	2	3	16.618
6	2	3	1	18.052
7	3	1	3	17.404
8	3	2	1	17.894
9	3	3	2	21.690
K ₁	16.003	16.375	16.978	
K ₂	17.134	17.739	19.043	
K ₃	18.996	18.020	16.113	
R	2.993	1.645	2.930	

在每个因子中, K 定义为所有级别的评估指标的总和, 当 K 最大时, 该因子被定义为最佳水平。极差 R 定义为 K 的最大值和最小值之间的范围, 并用于评估因子的重要性。由表 2 可得, A, C 这 2 个因素对萃取率的影响较大, 因素 B 对萃取率的影响较小。表中 A 因素一列中, $K_3 > K_2 >$

K_1 , 由此可知, A3 为因素 A 的最优条件。同理, 可知 B3, C2 分别为相应因素的最优条件。各个因素间的方差分析如表 3 所示。

表 3 方差分析表 (携带剂为甲醇)

Tab.3 Table of variance analysis (carrier is methanol)

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
时间	13.699	2	1.287	1.76
温度	4.643	2	0.436	1.76
液固比	13.594	2	1.277	1.76
误差	31.936	2		

注: F 比越大, 说明影响程度越大, 显著性越高。

根据极差 R 的大小以及各个因素偏差平方和, 可知各因素对萃取率影响程度为时间因素影响最大, 液固比因素次之, 温度因素影响最小。由此可得, 携带剂为甲醇时, 索氏萃取微藻粗脂实验的最优条件为: 时间 12 h, 温度 100 ℃, 液固比 15 : 1。实验所得最大萃取率为 21.690%。

b. 携带剂为乙醇。因素和水平分析如表 4 所示。

表 4 因素及水平分析 (携带剂为乙醇)

Tab.4 Factors and level analysis (carrier is ethanol)

因素水平	A	B	C
	时间/h	温度/℃	液固比/(mL · g ⁻¹)
1	8	90	30 : 1
2	10	95	15 : 1
3	12	100	10 : 1

根据表 4 的实验因素, 设计正交试验, 得到的实验数据如表 5 所示(见下页)。

由表 5 可得, B, C 这 2 个因素对萃取率的影响较大。表中 A 因素一列中, $K_1 > K_3 > K_2$, 由此可知, A1 为因素 A 的最优条件。同理, 可知 B3, C3 分别为相应因素的最优条件。各个因素间的方差分析如表 6 所示(见下页)。

根据极差 R 的大小以及各个因素偏差平方和, 可知各因素对萃取率影响程度为温度因素要大于液固比因素, 液固比因素大于时间因素。由此可得, 携带剂为乙醇时, 索氏萃取法萃取微藻粗脂的最优实验条件为: 时间 8 h, 温度 100 ℃, 液固比 10 : 1。实验所得最大萃取率为 30.479%。

2.1.2 结果分析

萃取时间对微藻粗脂的萃取率有一定的影

表 5 正交试验方法及结果（携带剂为乙醇）

Tab.5 Orthogonal test methods and results (carrier is ethanol)

因素水平	A	B	C	萃取率/%
	时间/h	温度/℃	液固比/(mL·g ⁻¹)	
1	1	1	1	21.275
2	1	2	2	20.053
3	1	3	3	30.479
4	2	1	2	16.660
5	2	2	3	24.089
6	2	3	1	20.191
7	3	1	3	20.969
8	3	2	1	25.163
9	3	3	2	24.086
K ₁	23.936	19.635	22.210	
K ₂	20.313	23.102	20.266	
K ₃	23.406	24.919	25.179	
R	3.622	5.284	4.913	

表 6 方差分析表（携带剂为乙醇）

Tab.6 Table of variance analysis (carrier is ethanol)

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
时间	22.968	2	0.669	1.76
温度	43.241	2	1.260	1.76
液固比	36.729	2	1.070	1.76
误差	102.938	2		

注：F 比越大,说明影响程度越大,显著性越高。

响。当萃取时间较短时，携带剂和物料的接触时间过短，不能充分渗入物料细胞内，这就减小了携带剂与粗脂接触的概率，这对萃取率的提高是不利的。当萃取时间较长时，一方面会增大携带剂的挥发，另一方面也会降低萃取粗脂的效率。当携带剂为甲醇时，在虹吸和回流的作用下，每一次浸泡微藻的溶剂都是纯的甲醇，由于粗脂在原料和溶剂中的浓度差，推动其扩散至原料表面，进而溶解至溶剂中。随着时间的延长，微藻粗脂逐渐在烧瓶中富集。因此，此时实验时间的最优条件是 12 h。当携带剂为乙醇时，可能是因为乙醇萃取出易挥发成分，挥发至冷凝管后冷凝；当时间进一步延长时，在冷凝管上冷凝的成分又随溶剂滴入提取管中。因此，此时实验时间

的最优条件是 8 h。

温度对萃取率有较大影响。当温度较高时，可以加快溶剂的蒸发，增多萃取次数，进而提高萃取率；但是，温度也不可过高，这是因为，一则会增大能源消耗，二则会减少单独一次虹吸过程携带剂和物料的接触时间，不利于萃取率的提高。

随着实验温度的升高，萃取率逐渐增大。这是由于温度直接影响到回流速率，温度越高，回流速率越大，萃取率越大。但是，回流速率并不是越快越好，一般为 5~10 次/h^[6]。本次实验，携带剂为乙醇时，回流速率为 1~3 次/h；携带剂为甲醇时，回流速率为 3~4 次/h。携带剂为甲醇或者乙醇时，实验温度最佳条件均为 100 ℃。

利用有机溶剂萃取微藻粗脂的本质是传质过程，传质过程的动力是液固之间溶剂的浓度差，携带剂通过渗入细胞内溶解粗脂再将其带出。当液固比较小时，传质过程的动力较小，不利于携带剂将细胞中的粗脂萃取出来；当液固比较大时，会由于携带剂添加量的增大，增加萃取过程的成本。

当携带剂为甲醇时，由于受到萃取管溶剂的限制，加入携带剂至少要淹没虹吸管上口，每组实验携带剂用量固定，均为 3 000 mL，微藻用量分别为 10，20，30 g。当液固比较小时，由于甲醇沸点较低，回流速度较快，滤纸筒内部藻粉末与携带剂充分接触；当液固比较大时，藻粉在萃取管中所占比例较小，携带剂所占比例较大，导致萃取管中的携带剂未被充分利用，此时液固比最佳条件为 15：1。当携带剂为乙醇时，由于乙醇相较于甲醇，回流速率较慢，滤纸筒中的藻粉与携带剂接触时间较长，此时液固比最佳条件为 30：1。

2.2 超声波萃取

2.2.1 正交试验设计

参考文献[10-12]中相关最佳萃取条件并结合设备相关参数，确定本实验的参数水平，实验因素水平如表 7 所示。

根据表 7 的实验因素，设计正交实验，得到的实验数据如表 8 所示。萃取率按照式(1)求得。

由表 8 可得，A，B，C 这 3 个因素对萃取率的影响较大，因素 D 对萃取率的影响较小。表中 A 因素一列中，K₁>K₂>K₃，由此可知，A1 为因素 A 的最优条件。同理，可知 B3，C3，D2 分别为

表 7 实验因素及水平
Tab.7 Experimental factors and levels

因素水平	A	B	C	D
	液固比/(mL · g ⁻¹)	超声波功率/W	温度/℃	时间/h
1	120 : 1	180	30	1
2	60 : 1	300	35	2
3	30 : 1	600	40	3

表 8 正交实验方法及结果
Tab.8 Orthogonal test methods and results

因素水平	A	B	C	D	萃取率/%
	液固比/(mL · g ⁻¹)	超声波功率/W	温度/℃	时间/h	
1	1	1	1	1	26.437
2	1	2	2	2	46.142
3	1	3	3	3	53.512
4	2	1	2	3	26.056
5	2	2	3	1	40.411
6	2	3	1	2	32.268
7	3	1	3	2	27.891
8	3	2	1	3	20.566
9	3	3	2	1	29.328
K ₁	42.031	26.795	26.423	32.059	
K ₂	32.911	35.706	33.842	35.434	
K ₃	25.928	38.369	40.605	33.378	
R	16.102	11.575	14.181	3.375	

相应因素的最优条件。各个因素间的方差分析如表 9 所示。

表 9 方差分析表
Tab.9 Table of variance analysis

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值
液固比	391.212	2	1.681	1.66
超声波功率	220.485	2	0.947	1.66
温度	301.870	2	1.297	1.66
时间	17.355	2	0.075	1.66
误差	930.922	2		

注: F 比越大, 说明影响程度越大, 显著性越高。

根据极差 R 的大小以及各个因素偏差平方和, 可知各因素对萃取率影响程度为液固比因素影响最大, 温度因素大于超声波功率因素, 时间

因素影响最小。由此可得, 超声波萃取微藻粗脂实验的最优条件为: 液固比 120 : 1, 温度 40 ℃, 超声波功率 600 W, 时间 2 h。实验所得最大萃取率为 53.512%。

2.2.2 结果分析

萃取过程中, 液固比对萃取率影响最大。液固比越大, 混合液的流动性越好, 粗脂在藻粉和携带剂之间的渗透压不断加大, 进而使传质效率得到提高^[13]。微藻粗脂在常温乙醇中的溶解度较低, 液固比增大, 也有利于粗脂在携带剂中的溶解。同时, 液固比较大时, 对后期抽滤等步骤都是有利的^[14]。因此, 实验液固比的最佳条件为 120 : 1。

超声波功率对萃取有较大影响。在萃取过程中, 超声波功率的增大具有双重效果: 一方面, 功率越大, 声波震荡的能量越大, 空化效应越明显, 萃取率越大; 另一方面, 随着功率的增大, 产生的气泡越大, 数量也越多, 阻碍声波的传播, 从而使超声波作用范围缩小, 另外, 空化效应越强, 由此引起的热效应就越强, 从而导致溶剂的损失量增大。超声波对萃取率的影响大小, 与原料的粒径也有关系。杜双奎等^[14]的研究表明, 在一定的粒径范围内(小于 0.3 mm), 粒径大小对亚麻籽油出油率的影响较为明显。本实验所用微藻粒径小于 0.85 mm, 可以得到功率对萃取率的影响较为明显, 这与杜双奎等^[14]的研究比较类似。综上, 实验功率的最佳条件为 600 W。

温度对萃取率有一定影响的影响, 温度越高, 粗脂和携带剂中分子的热运动越剧烈。孙协军等^[12]利用超声波法萃取盐藻粗脂, 实验表明, 40 ℃ 时, 盐藻萃取率最大, 这与本实验的结论比较类似。温度的升高会导致溶剂的损失增大, 所以, 温度的设置也不能过高。因此, 实验温度的最优条件是 40 ℃。

在实验过程中, 时间对萃取具有一定影响。微藻和携带剂的混合物在反应罐和超声波发生器组成的回路中循环, 萃取时间越长, 超声波对混合物的作用次数越多, 萃取率越大。但当时间过长时, 由于超声波空化作用产生的热效应使微藻粗脂中的热敏感成分发生氧化分解反应, 从而降低了萃取率。因此, 实验时间的最佳条件为 2 h。

2.3 两种萃取微藻粗脂方法的比较

实验所用两种方法萃取微藻的最优实验条件以及实验所得最大萃取率如表 10 所示。由表 10

可得：超声波法萃取率最大，基本相当于超临界CO₂法所得萃取率的近2倍；超声波萃取法所需携带剂的量较大，这主要是受到本次实验所用设备反应罐容积的限制；索氏提取法耗时较长，超声耗时较短，但设备投入费用较高。

表 10 两种微藻粗脂萃取方法的比较
Tab.10 Comparison of the two microalgae crude lipid extraction methods

方 法	最优条件				萃取率/%
	时间/h	温度/℃	液固比/(mL·g ⁻¹)	功率/W	
索氏萃取法	8	100	10 : 1		30.479
超声波萃取法	2	40	120 : 1	600	53.512

综上所述，从萃取率的角度来看，超声波萃取法优于索氏萃取法，索氏萃取法对设备要求不高，实验成本较低。

3 结 论

采用索氏萃取法萃取微藻粗脂，以裂殖壶藻为原料，分别采用甲醇和乙醇为携带剂。通过对正交实验结果的分析，研究时间、温度、液固比以及携带剂对萃取率的影响，得出以下结论：当以甲醇为携带剂时，各因素对萃取率影响程度为时间因素影响最大，液固比因素次之，温度因素影响最小，最优条件为时间 12 h，温度 100 ℃，液固比 15 : 1，实验所得最大萃取率为 21.7%；当以乙醇为携带剂时，各因素对萃取率影响程度为温度因素影响最大，液固比因素次之，时间因素影响最小，最优实验条件为时间 8 h，温度 100 ℃，液固比 10 : 1，实验所得最大萃取率为 30.5%。由实验结果可知，以乙醇为携带剂，微藻粗脂萃取率更高。因此，超声波法萃取微藻粗脂实验都采用乙醇为携带剂。

采用超声波萃取微藻粗脂，实验以裂殖壶藻为原料，以乙醇为携带剂。通过设计正交实验，研究超声波法萃取微藻粗脂的最优条件。实验结果表明，各因素对萃取率影响程度为：液固比因素影响最大，温度因素大于超声波功率因素，时间因素影响最小。超声波法萃取微藻粗脂实验的最优条件为：液固比 120 : 1，温度 40 ℃，超声波功率 600 W，时间 2 h。实验所得最大萃取率为 53.5%。

通过对比两种萃取微藻粗脂的方法，可得超声波萃取法优于索氏萃取法；但索氏萃取法对设备要求不高，实验成本较低。两种方法所得粗脂成分的种类和含量仍需进一步通过实验进行确定。

参考文献：

[1] 朱斌斌. 利用微藻油脂制备生物柴油的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.

[2] 张锐, 刘建群, 舒积成, 等. 超声辅助提取美洲大蠊药渣残油及其制备生物柴油的研究[J]. 天然产物研究与开发, 2017, 29(1): 114–119.

[3] VIGUERA M, MARTI A, MASCA F, et al. The process parameters and solid conditions that affect the supercritical CO₂ extraction of the lipids produced by microalgae[J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2016, 113(6): 16–22.

[4] TANG S K, QIN C R, WANG H Q, et al. Study on supercritical extraction of lipids and enrichment of DHA from oil-rich microalgae[J]. *Journal of Supercritical Fluids*, 2011, 57(1): 44–49.

[5] 黄雄超. 微藻油脂的提取及制备生物柴油的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2012.

[6] 段敏. 小球藻油制备生物柴油的试验和优化工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[7] 韦芳三, 李纯厚, 戴明, 等. 索氏提取法测定海洋微藻粗脂肪含量及其优化方法的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(4): 619–623.

[8] 邓祥元, 高坤, 景吉, 等. 索氏法提取微藻油脂的工艺优化研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(22): 11370–11385.

[9] 张宪利, 张静, 赵凤娟, 等. 索氏提取法提取裂殖壶菌粉油脂参数的优化[J]. *绿色科技*, 2015(8): 294–296.

[10] 翟量, 沈立荣. 富含 EPA 微藻油超声波辅助溶剂法提取工艺优化及脂肪酸成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(2): 809–815.

[11] 李秀霞, 孙协军, 王珍, 等. 响应面法优化盐藻油的超声波辅助提取工艺[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(8): 203–207.

[12] 孙协军, 李秀霞, 冯彦博, 等. 盐藻油超声波提取工艺优化及理化性质分析[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(2): 93–97.

[13] 李林强, 李建科, 刘迎利. 超声波处理提取华山松籽油的研究[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2003, 31(5): 115–117.

[14] 杜双奎, 于修烛, 王青林, 等. 超声波辅助提取亚麻籽油的研究[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(4): 70–73.