

# 莼菜多糖的提取工艺优化研究

张守花<sup>1</sup>, 张新海<sup>1</sup>, 刘延奇<sup>2</sup>, 秦令祥<sup>3\*</sup>

(1. 鹤壁职业技术学院, 河南 鹤壁 458030; 2. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450002;  
3. 漯河市食品研究院有限公司, 河南 漯河 462300)

**摘要:**该文研究高压脉冲电场耦合复合酶法提取莼菜多糖最佳工艺条件。以莼菜多糖提取率为指标, 采用单因素试验和正交试验, 确定最佳工艺参数。结果表明, 高压脉冲电场提取最佳工艺参数为: 料液比 1:30 (g/mL), 提取时间 40 min, 电场强度 25 kV/cm, 脉冲数 6。在此条件下莼菜多糖提取率为 10.75%。在高压脉冲电场提取后, 再耦合复合酶法提取, 最佳酶解工艺参数为: 复合酶(木瓜蛋白酶:纤维素酶:果胶酶为 1:1:1, 质量比)添加量 2.5%, 酶解 pH 4.5, 酶解时间 60 min, 酶解温度 40 °C, 在此优化条件下莼菜多糖提取率为 12.27%。与单一的高压脉冲电场提取相比, 高压脉冲电场耦合复合酶法提取莼菜多糖的提取率明显提高, 为莼菜多糖的提取提供一种新的方法。

**关键词:** 莼菜多糖; 高压脉冲电场; 复合酶; 提取工艺; 正交试验

## Optimization of Polysaccharide Extraction from *Brasenia schreberi*

ZHANG Shou-hua<sup>1</sup>, ZHANG Xin-hai<sup>1</sup>, LIU Yan-qi<sup>2</sup>, QIN Ling-xiang<sup>3\*</sup>

(1. Hebi Polytechnic, Hebi 458030, Henan, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, Henan, China; 3. Luohe Food Research Institute Co., Ltd., Luohe 462300, Henan, China)

**Abstract:** In this study, the extraction of high-intensity pulsed electric field-coupled compound enzyme of *Brasenia schreberi* polysaccharide (BSP) was investigated. The extraction rate was used as the index, and the optimal process parameters were determined through single-factor and orthogonal tests. The results showed that the optimum technological parameters of high-intensity pulsed electric field extraction were as follows: solid-liquid ratio 1:30 (g/mL), extraction time 40 min, electric field intensity 25 kV/cm, and number of pulses 6. Under these conditions, the BSP extraction rate was 10.75%. After high-intensity pulsed electric field extraction, compound enzyme extraction was performed. The optimum technological parameters for enzymatic hydrolysis were as follows: compound enzyme addition (papain:cellulose enzyme:pectinase 1:1:1, mass ratio) 2.5%, enzymolysis pH 4.5, enzymolysis time 60 min, and enzymolysis temperature 40 °C. Under these conditions, the BSP extraction rate was 12.27%. Compared to the single high-intensity pulsed electric field extraction, the extraction rate of polysaccharides from *B. schreberi* using the high-intensity pulsed electric field-coupled compound enzyme method significantly improved, and the proposed method is suitable for extracting polysaccharides from *B. schreberi*.

**Key words:** *Brasenia schreberi* polysaccharide; high intensity pulsed electric fields; compound enzyme; extraction technology; orthogonal test

引文格式:

张守花, 张新海, 刘延奇, 等. 莼菜多糖的提取工艺优化研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 138-144.

ZHANG Shouhua, ZHANG Xinhai, LIU Yanqi, et al. Optimization of Polysaccharide Extraction from *Brasenia schreberi*[J]. Food Research and Development, 2021, 42(15): 138-144.

作者简介: 张守花(1977—), 女(汉), 副教授, 硕士, 研究方向: 精细化工和食品品质研究。

\* 通信作者: 秦令祥(1982—), 男(汉), 副教授、高级工程师, 硕士, 研究方向: 功能性成分提取。

莼菜(*Brasenia schreberi*),别称马蹄菜、水葵等,属睡莲科的莼属,多年生水生宿根草本植物<sup>[1]</sup>,广泛分布于东亚、大洋洲、西非和北美地区。莼菜是一种珍贵的水生蔬菜,富含多糖、蛋白质、氨基酸、维生素和微量元素等,具有良好的食用和药用价值<sup>[2-3]</sup>。莼菜具有清热补血、润肺解毒、利尿消肿、健胃促消化、止泻止呕、增强免疫力、抗肿瘤、降三高、抗衰老等功效<sup>[4-5]</sup>,对胃溃疡、肿痛、黄疸和热痢等有治疗作用<sup>[6-8]</sup>,有“水中人参”、“美容佳蔬”和“抗癌佳品”之称<sup>[9]</sup>。莼菜多糖(*Brasenia schreberi* polysaccharide, BSP)是莼菜中含有的一种重要的生物活性成分,具有提高免疫力和改善亚健康的作用<sup>[10-11]</sup>。

目前,植物多糖的提取主要有热水浸提、酶解<sup>[12]</sup>、微波辅助、超声波辅助<sup>[13]</sup>和微波协同酶解<sup>[14]</sup>等方法,这些方法都各有优缺点。高压脉冲电场(high intensity pulsed electric fields, HPEP)是一种新兴的现代高新提取技术,其原理是利用瞬间脉冲高压破壁植物细胞壁,使细胞膜电位混乱,使其可逆或不可逆破裂,促进极性分子在细胞内定向排列,功效成分溶出。该技术具有非热性传递均匀、效率高、能耗低、环保等优点,广泛应用于天然产物功能成分的提取<sup>[15-19]</sup>。酶解法是利用酶破坏细胞壁,溶出功效成分。高压脉冲电场耦合复合酶技术是一种新型、先进的天然产物提取技术,具有提取率高、提取温度低、提取时间短、能耗低、对活性成分损伤小等优点<sup>[20-21]</sup>。然而,高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP的研究尚未见报道。因此,本研究采用高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP,在单因素试验的基础上,通过正交试验优化提取工艺,以期提高BSP提取率,为后续BSP的开发利用提供基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

莼菜(人工种植):苏州东山东湖莼菜厂;纤维素酶(20 000 U/g):河北利华生物科技有限公司;木瓜蛋白酶(100 000 U/g):陕西源优生物科技有限公司;果胶酶(20 000 U/g):北京蓝博斯特生物有限公司;硫酸、无水乙醇、葡萄糖、苯酚、氢氧化钠、柠檬酸、磷酸氢二钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

DE-100型高精度双极高压静电场发生器:宁波新芝生物科技有限公司;RE-3000A旋转蒸发器:上海耀特仪器设备有限公司;760CRT紫外-可见分光光度计:上海仪电分析仪器有限公司;PE-28酸度计:北京梅特勒-托利多仪器有限公司;D2015W电动搅拌器:上海梅颖浦仪器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 莼菜粉的制备

将莼菜经氢氧化钠溶液脱去体外胶质后,再用清水淋洗,热风干燥,匀浆机剪切制得莼菜粉,备用。

#### 1.3.2 BSP的提取

莼菜粉→按比例加水搅拌均匀→高压脉冲电场提取→取出调节pH值(柠檬酸和磷酸氢二钠缓冲液)→复合酶法提取→提取液 Sevag 法<sup>[22]</sup>脱蛋白→离心(5 000 r/min, 10 min)→上清液减压浓缩→加乙醇沉淀(3倍体积95%乙醇)→静置(放入4℃冰箱,静置24h)→离心(5 000 r/min, 10 min)→真空冷冻干燥→莼菜粗多糖。

#### 1.3.3 BSP测定

BSP测定采用苯酚-硫酸法<sup>[23]</sup>。

#### 1.3.4 BSP提取率计算

BSP提取率计算公式如下。

$$\text{BSP提取率}/\% = (\text{提取的多糖量}/\text{提取的莼菜粉样品量}) \times 100$$

#### 1.3.5 高压脉冲电场提取BSP试验设计

##### 1.3.5.1 高压脉冲电场提取BSP的单因素试验设计

按1.3.2的方法,称取10g莼菜粉5份进行高压脉冲电场提取BSP,研究不同因素对BSP提取率的影响。固定条件:料液比1:30(g/mL),电场强度20kV/cm,脉冲数8,提取时间30min。分别设定料液比为1:10、1:20、1:30、1:40、1:50(g/mL),电场强度为10、15、20、25、30kV/cm,脉冲数为2、4、6、8、10,提取时间为10、20、30、40、50min,进行单因素试验。每组重复3次,取平均值。

##### 1.3.5.2 高压脉冲电场提取BSP的正交试验设计

在预试验和单因素试验的基础上,选取表1列出的4个因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验优化提取工艺。试验水平设计见表1。

表1 正交试验因素水平

Table 1 Factor levels of orthogonal experimental design

水平	因素			
	A 料液比/(g/mL)	B 电场强度/(kV/cm)	C 脉冲数	D 提取时间/min
1	1:20	15	6	20
2	1:30	20	8	30
3	1:40	25	10	40

#### 1.3.6 高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP试验设计

##### 1.3.6.1 高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP的单因素试验设计

经高压脉冲电场提取后,再按1.3.2的方法称取10g莼菜粉5份耦合复合酶法提取BSP,研究不同因

素对 BSP 提取率的影响。固定条件:复合酶(木瓜蛋白酶:纤维素酶:果胶酶质量比为 1:1:1)添加量 2.5%,酶解 pH4.5,酶解温度 50 ℃,酶解时间 50 min。分别设定复合酶添加量 1.0%、1.5%、2.0%、2.5%和 3.0%,酶解 pH3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0,酶解温度 30、40、50、60、70 ℃,酶解时间 20、30、40、50、60 min,进行单因素试验。每组重复 3 次,取平均值。

### 1.3.6.2 高压脉冲电场耦合复合酶法提取 BSP 的正交试验设计

在预试验和单因素试验的基础上,选取表 2 列出的 4 个因素,采用  $L_9(3^4)$  正交试验优化提取工艺。试验水平设计见表 2。

表 2 正交试验因素水平

水平	因素			
	E 复合酶添加量/%	F 酶解 pH 值	G 酶解温度/℃	H 酶解时间/min
1	2.0	4.0	40	40
2	2.5	4.5	50	50
3	3.0	5.0	60	60

### 1.3.7 数据处理

试验所得数据均为 3 个平行测定的结果的平均值。试验数据采用 Excel 整理,采用正交设计助手进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 高压脉冲电场提取 BSP 工艺条件优化

#### 2.1.1 料液比对 BSP 提取率的影响

料液比对 BSP 提取率的影响见图 1。

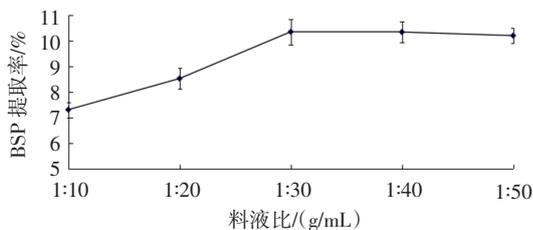


图 1 料液比对 BSP 提取率的影响

Fig.1 Effect of solid-liquid ration on the BSP extraction rate

由图 1 可知,BSP 提取率随着溶剂用量的增加先升高后趋于平缓。这是因为溶剂用量增加,莼菜细胞与其接触面之间的浓度差增大,促进了多糖的浸出,提取率升高。但当溶剂用量达到一定值时,多糖基本完全被溶出,提取率不再显著升高,而趋于稳定。这与代名君等<sup>[24]</sup>的研究结果趋势相似。因此,料液比 1:30(g/mL)为佳。

#### 2.1.2 电场强度对 BSP 提取率的影响

电场强度对 BSP 提取率的影响见图 2。

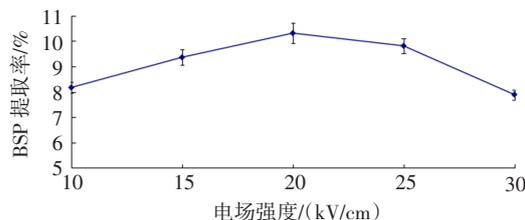


图 2 电场强度对 BSP 提取率的影响

Fig.2 Effect of electric field intensity on the BSP extraction rate

由图 2 可知,BSP 提取率随着电场强度的增加先升高再降低。这是因为电场强度增加,莼菜细胞破坏增多,极性溶剂运动加快,进入细胞的溶剂增多,多糖溶出更易,提取率升高。当电场强度  $\geq 20$  kV/cm 时,过大的电场强度会使多糖降解,提取率降低。这与 Wang Ke 等<sup>[25]</sup>的研究结果趋势相似。因此,电场强度 20 kV/cm 为佳。

#### 2.1.3 脉冲数对 BSP 提取率的影响

脉冲数对 BSP 提取率的影响见图 3。

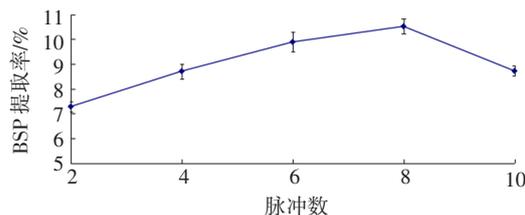


图 3 脉冲数对 BSP 提取率的影响

Fig.3 Effect of the number of pulses on the BSP extraction rate

由图 3 可知,BSP 提取率随着脉冲数的增加先升高再降低。这是因为脉冲次数增加,电场作用于提取液的程度和频率增加,莼菜细胞破坏的程度和数量增加,提取率升高。当脉冲数  $\geq 8$  时,过大的电场和脉冲频率增强了多糖的电解,促使多糖部分降解,提取率降低。这与 Zhou Yajun 等<sup>[26]</sup>的研究结果趋势相似。因此,脉冲数 8 为佳。

#### 2.1.4 提取时间对 BSP 提取率的影响

提取时间对 BSP 提取率的影响见图 4。

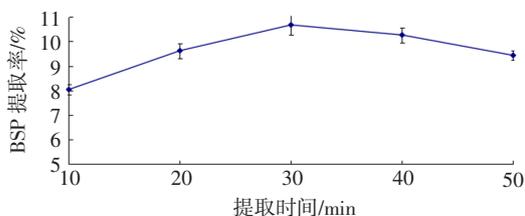


图 4 提取时间对 BSP 提取率的影响

Fig.4 Effect of extraction time on the BSP extraction rate

由图 4 可知,BSP 提取率随着提取时间的延长先

升高后降低。这是因为提取时间增加,高压电场作用程度增加,细胞破裂程度和数量增多,提取率升高。当提取时间 $\geq 30$  min时,细胞基本完全破裂,再继续延长提取时间,多糖结构会部分被破坏,提取率降低。这与周亚军等<sup>[27]</sup>的研究结果趋势相似。因此,提取时间30 min为佳。

### 2.1.5 高压脉冲电场提取 BSP 正交试验结果

高压脉冲电场提取 BSP 的正交试验结果见表 3。

表 3 正交试验结果

Table 3 The result of orthogonal experimental design

试验编号	因素				BSP 提取率/%
	A 料液比/(g/mL)	B 电场强度/(kV/cm)	C 脉冲数	D 提取时间/min	
1	1:20	15	6	20	7.68
2	1:20	20	8	30	8.53
3	1:20	25	10	40	9.27
4	1:30	15	8	40	10.28
5	1:30	20	10	20	9.14
6	1:30	25	6	30	10.73
7	1:40	15	10	30	9.57
8	1:40	20	6	40	9.11
9	1:40	25	8	20	9.34
k <sub>1</sub>	8.493	9.053	9.390	8.647	
k <sub>2</sub>	9.993	9.177	9.287	9.477	
k <sub>3</sub>	9.417	9.673	9.227	9.780	
R	1.500	0.620	0.163	1.133	

高压脉冲电场提取 BSP 的方差分析结果见表 4。

表 4 方差分析结果

Table 4 The variance analysis results

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
A 料液比	3.435	2	83.780	19.000	*
B 电场强度	0.646	2	15.756	19.000	
C 脉冲数	0.041	2	1.000	19.000	
D 提取时间	2.065	2	50.366	19.000	*
误差	0.04	2			

注:\*表示差异显著, $P<0.05$ 。

由表 3、表 4 结果分析可知,各因素影响关系为: $A>D>B>C$ 。料液比和提取时间对 BSP 提取率的影响较大,达到显著水平,其它不显著。通过 k 值的分析,其最佳工艺参数为:料液比 1:30 (g/mL),提取时间 40 min,电场强度 25 kV/cm,脉冲数 6。在上述最佳条件下做验证试验,平行验证 3 次,BSP 提取率为 10.75%(3 次平均值)。

## 2.2 高压脉冲电场耦合复合酶法提取 BSP 工艺条件的优化

在高压脉冲电场提取 BSP 的最佳工艺条件下,再进一步耦合复合酶法提取 BSP。

### 2.2.1 复合酶添加量对 BSP 提取率的影响

复合酶添加量对 BSP 提取率的影响见图 5。

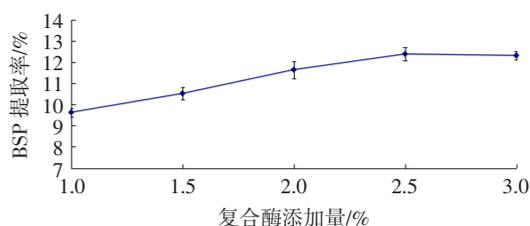


图 5 复合酶添加量对 BSP 提取率的影响

Fig.5 Effect of compound enzyme addition on the BSP extraction rate

由图 5 可知,BSP 提取率随复合酶添加量的增加先升高再趋于稳定。这是因为,酶添加量的增加,加大了与底物接触面积,酶解更充分,多糖溶出增多,提取率升高。当复合酶添加量 $\geq 2.5\%$ 时,酶解反应基本完全,再继续增加添加量,多糖提取率也不会显著变化而是趋于稳定。HUYNH 等<sup>[28]</sup>的研究也表明酶添加量过多,酶解已完全,对提取率影响不明显而趋于稳定。因此,复合酶添加量 2.5%为佳。

### 2.2.2 酶解 pH 值对 BSP 提取率的影响

酶解 pH 值对 BSP 提取率的影响见图 6。

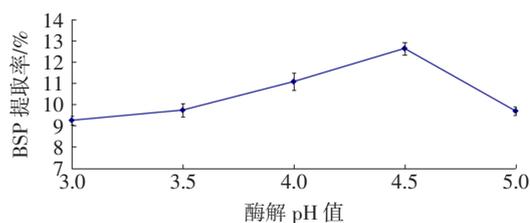


图 6 酶解 pH 值对 BSP 提取率的影响

Fig.6 Effect of enzymolysis pH value on the BSP extraction rate

由图 6 可知,BSP 提取率随着酶解 pH 值的增大呈先升高再降低的趋势。这是因为,pH 值是影响酶活性的重要因素之一,酶解反应在最适宜 pH 值时,酶活性最高,酶解最充分,提取率也最高,反之提取率降低。这与孟利娜等<sup>[29]</sup>的研究结果趋势相似。因此,酶解 pH 值为 4.5 最佳。

### 2.2.3 酶解温度对 BSP 提取率的影响

酶解温度对 BSP 提取率的影响见图 7。

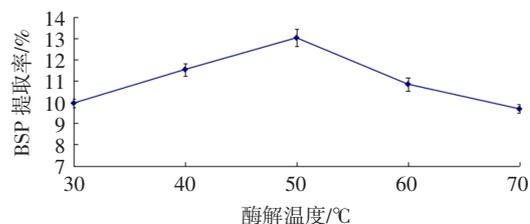


图 7 酶解温度对 BSP 提取率的影响

Fig.7 Effect of enzymolysis temperature on the BSP extraction rate

由图7可知,BSP提取率随着酶解温度的升高呈先升高再降低的趋势。这是因为酶解温度升高,酶活性增强,酶解反应加快,多糖溶出增多,提取率升高;当酶解温度 $\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,酶活性开始降低,再继续增加酶解温度,部分酶会失去活性,提取率降低。这与李晓等<sup>[30]</sup>的研究结果趋势基本一致。因此,酶解温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最佳。

#### 2.2.4 酶解时间对BSP提取率的影响

酶解时间对BSP提取率的影响见图8。

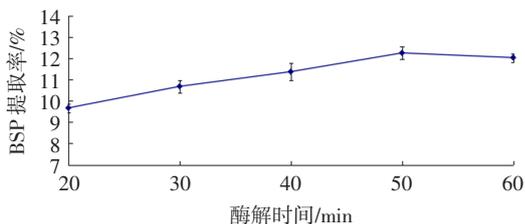


图8 酶解时间对BSP提取率的影响

Fig.8 Effect of enzymolysis time on the BSP extraction rate

由图8可知,BSP提取率随着酶解时间的延长先升高再趋于平缓。这是因为,酶解时间过短,酶解程度较低,酶解不充分,多糖溶出不多;而酶解时间达到最佳时间后,酶解已经完全,再延长酶解时间,提取率也不会明显升高而趋于平缓。这与Sowbhagya等<sup>[31]</sup>的研究结果趋势基本相似。因此,酶解时间 $50\text{ min}$ 最佳。

#### 2.2.5 高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP正交试验结果

高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP正交试验结果见表5。

表5 正交试验结果

Table 5 The result of orthogonal experimental design

试验序号	因素				BSP提取率/%
	E复合酶添加量/%	F酶解pH值	G酶解温度/ $^{\circ}\text{C}$	H酶解时间/min	
1	2.0	4.0	40	40	10.51
2	2.0	4.5	50	50	11.64
3	2.0	5.0	60	60	10.43
4	2.5	4.0	50	60	12.25
5	2.5	4.5	60	40	12.19
6	2.5	5.0	40	50	11.83
7	3.0	4.0	60	50	10.64
8	3.0	4.5	40	60	11.56
9	3.0	5.0	50	40	9.71
$k_1$	10.860	11.133	11.300	10.803	
$k_2$	12.090	11.797	11.200	11.370	
$k_3$	10.637	10.657	11.087	11.413	
R	1.453	1.140	0.213	0.610	

高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP的方差分析结果见表6。

表6 方差分析结果  
Table 6 The variance analysis results

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
E复合酶添加量	3.675	2	54.044	19.000	*
F酶解pH值	1.967	2	28.192 6	19.000	*
G酶解温度	0.068	2	1.000	19.000	
H酶解时间	0.695	2	10.221	19.000	
误差	0.07	2			

注:\*表示差异显著, $P<0.05$ 。

由表5、表6结果分析可知,各因素的影响顺序为: $E>F>H>G$ ,复合酶添加量和酶解pH值对BSP提取率的影响较大,达到了显著水平,其它不显著。通过对k值的分析,高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP的最佳工艺参数为: $E_2F_2G_1H_3$ ,即复合酶添加量 $2.5\%$ ,酶解pH值 $4.5$ ,酶解时间 $60\text{ min}$ ,酶解温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此最佳条件下进行验证试验,平行验证3次,得到BSP提取率为 $12.27\%$ (3次平均值)。

### 3 结论

本试验为了比较单一提取方法提取BSP和复合提取方法提取BSP的不同,试验先进行高压脉冲电场法提取BSP,再进行高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP,并对其工艺进行优化,得到最佳工艺参数为:料液比 $1:30(\text{g/mL})$ ,提取时间 $40\text{ min}$ ,电场强度 $25\text{ kV/cm}$ ,脉冲数6;然后再耦合复合酶法提取,复合酶添加量 $2.5\%$ ,酶解pH值 $4.5$ ,酶解时间 $60\text{ min}$ ,酶解温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该条件下,BSP提取率为 $12.27\%$ 。本试验所用的高压脉冲电场耦合复合酶法提取BSP,与单一的高压脉冲电场提取相比,其提取率明显提高,是一种新的提取BSP的方法,为后续BSP的开发利用提供基础。

### 参考文献:

- [1] 崔杰,何正有,屠银芳,等. 莼菜多糖的分离、纯化及结构初步研究[J]. 中成药,2018,40(4):990-993.  
CUI Jie, HE Zhengyou, TU Yinfang, et al. Preliminary study on the isolation, purification and structure of polysaccharides from *Brassica schreberi*[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2018, 40(4): 990-993.
- [2] 孙海红, 薛鲁燕, 孙永红, 等. 莼菜多糖的提取及理化性质分析[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(2): 158-161.  
SUN Haihong, XUE Luyan, SUN Yonghong, et al. Study on extraction and physicochemical properties of polysaccharide from *Brassica schreberi*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 158-161.
- [3] 李燕, 柯剑鸿, 焦大春, 等. 莼菜的营养价值及其应用研究进展[J]. 长江蔬菜, 2018(18): 36-39.

- LI Yan, KE Jianhong, JIAO Dachun, et al. Research progress on nutritional value and application of *Brasenia schreberi*[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2018(18): 36–39.
- [4] 吴洪梅, 吕泽芳, 张昭, 等. 四大蕹菜产区商品成分种类和质量分数测定及比较研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 76–82.
- WU Hongmei, LÜ Zefang, ZHANG Zhao, et al. A comparative study of the commercially valuable components of water shield (*Brasenia schreberi*) from 4 cultivation areas in China[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2017, 39(5): 76–82.
- [5] 刘翠俐, 于秋英. 蕹菜多糖粘胶降血糖作用的研究[J]. 职业与健康, 2004, 20(6): 142–143.
- LIU Cuili, YU Qiuying. Study on the effect of Chuncai polysaccharide on lowering blood sugar[J]. Occupation and Health, 2004, 20(6): 142–143.
- [6] 王慧芳, 谈如蓝. 蕹菜的药用价值与综合开发应用[J]. 现代食品, 2016(13): 45–46.
- WANG Huifang, TAN Rulan. Water shield medicinal values and comprehensive development and application[J]. Modern Food, 2016(13): 45–46.
- [7] 巩江, 倪士峰, 司衍乐, 等. 蕹菜药理学研究概述[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(10): 4489–4490.
- GONG Jiang, NI Shifeng, SI Yanle, et al. Overview on pharmaceutical research of *Brasenia schreberi* J.F.Gmel [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(10): 4489–4490.
- [8] XIAO H, CAI X, FAN Y, et al. Antioxidant activity of water-soluble polysaccharides from *Brasenia schreberi*[J]. Pharmacogn Mag, 2016, 12(47): 193–197.
- [9] 孙树侠, 王强, 张清, 等. 药食兼用型植物——蕹菜[J]. 中国食物与营养, 2000, 6(5): 18–19.
- SUN Shuxia, WANG Qiang, ZHANG Qing, et al. Plant for drug and food: *Brasenia schreberi*[J]. Food and Nutrition in China, 2000, 6(5): 18–19.
- [10] 刘美玉, 刁向银, 罗丽娟, 等. 蕹菜资源利用研究综述及展望[J]. 长江蔬菜, 2011(10): 7–10.
- LIU Meiyu, XI Xiangyin, LUO Lijuan, et al. Research summary and prospect on water shield (*Brasenia schreberi* J.F.Gmel.) resource utilization[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2011(10): 7–10.
- [11] 魏珺峻. 有机蕹菜种植项目可行性研究分析[J]. 南方农机, 2016, 47(12): 68–70.
- WEI Lijun. Analysis on feasibility study of organic *Brasenia schreberi* planting project[J]. Southern Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 68–70.
- [12] XU X F, YAN H D, TANG J, et al. Polysaccharides in *Lentinus edodes*: isolation, structure, immunomodulating activity and future prospective[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(4): 474–487.
- [13] ZHANG Y Y, LI S, WANG X H, et al. Advances in lentinan: Isolation, structure, chain conformation and bioactivities[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 196–206.
- [14] 黄越, 周春晖, 黄惠华. 不同提取方法猴头菇粗多糖的表征及其抗氧化活性的比较[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 80–86.
- HUANG Yue, ZHOU Chunhui, HUANG Huihua. Characterization and antioxidant activity analysis on the crude *Hericium erinaceus* polysaccharides extracted by different methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3): 80–86.
- [15] RAWSON A, PATRAS A, TIWARI B K, et al. Effect of thermal and non thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: Review of recent advances[J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1875–1887.
- [16] GUDERJAN M, ELEZ-MARTÍNEZ P, KNORR D. Application of pulsed electric fields at oil yield and content of functional food ingredients at the production of rapeseed oil[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2007, 8(1): 55–62.
- [17] 梁琦, 杨瑞金, 赵伟, 等. 高压脉冲电场对油酸的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 30(4): 86–89, 92.
- LIANG Qi, YANG Ruijin, ZHAO Wei, et al. Effects of pulsed electric fields on oleic acid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(4): 86–89, 92.
- [18] 孙建华, 韦泽沼, 刘斌, 等. 响应面法优化高压脉冲电场提取匙羹藤总皂苷[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(3): 363–368.
- SUN Jianhua, WEI Zezhao, LIU Bin, et al. Optimization of high voltage pulsed electric field on extraction of the total saponins of *Gymnema sylvestre* by response surface methodology[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2011, 36(3): 363–368.
- [19] 卢沿钢, 董全. 高压脉冲电场提取食品中天然产物的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 243–246, 274.
- LU Yangang, DONG Quan. Development of pulsed electric field on extraction of natural products in food[J]. Food & Machinery, 2012, 28(1): 243–246, 274.
- [20] 纵伟, 张薇薇, 赵光远, 等. 超高压提取大蒜渣多糖工艺条件的优化[J]. 中国调味品, 2014, 39(8): 20–22.
- ZONG Wei, ZHANG Weiwei, ZHAO Guangyuan, et al. Optimization of process conditions for polysaccharides from garlic residues by ultra-high pressure method[J]. China Condiment, 2014, 39(8): 20–22.
- [21] 李亚辉, 马艳弘, 黄开红, 等. 响应面法优化复合酶提取芦荟多糖工艺及其抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2014, 35(18): 63–68.
- LI Yahui, MA Yanhong, HUANG Kaihong, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis conditions for the extraction of *Aloe* polysaccharides using response surface methodology and assessment of their antioxidant activity[J]. Food Science, 2014, 35(18): 63–68.
- [22] 崔亦华, 崔英德, 易国斌. 应用广泛的天然多糖及其提取方法[J]. 广州化工, 2002, 30(3): 7–9.
- CUI Yihua, CUI Yingde, YI Guobin. Widely application and its extraction methods of the natural polysaccharide[J]. Guangzhou Chemical Industry and Technology, 2002, 30(3): 7–9.
- [23] 池源, 王丽波. 苯酚-硫酸法测定南瓜籽多糖含量的条件优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 89–92.

- CHI Yuan, WANG Libo. Study on phenol-sulfuric acid method for determination of polysaccharide content in pumpkin seeds[J]. Food & Machinery, 2014, 30(1): 89-92.
- [24] 代名君, 尤丽新, 文连奎, 等. 高压脉冲电场辅助提取葛花黄酮工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 94-98, 108.
- DAI Mingjun, YOU Lixin, WEN Liankui, et al. Technology optimization of total flavonoids extraction from *Pueraria lobata* by the high-intensity pulsed electric fields assistance[J]. Food Research and Development, 2016, 37(23): 94-98, 108.
- [25] WANG K, WANG Y, LIN S Y, et al. Analysis of DPPH inhibition and structure change of corn peptides treated by pulsed electric field technology[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(7): 4342-4350.
- [26] ZHOU Y J, HE Q, ZHOU D. Optimization extraction of protein from mussel by high-intensity pulsed electric fields[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(3): e12962.
- [27] 周亚军, 李圣桡, 王淑杰, 等. 高压脉冲电场协同酶法辅助提取玫瑰精油工艺优化[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 270-277.
- ZHOU Yajun, LI Shengrao, WANG Shujie, et al. Optimization of extraction of rose essential oil by high intensity pulsed electric field combined with enzymatic treatment-assisted steam distillation[J]. Food Science, 2020, 41(6): 270-277.
- [28] HUYNH N T, SMAGGHE G, GONZALES G B, et al. Enzyme-assisted extraction enhancing the phenolic release from cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *Botrytis*) outer leaves[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(30): 7468-7476.
- [29] 孟利娜, 于敬, 许静, 等. 酶法辅助提取北苍术挥发油的工艺及成分分析[J]. 中成药, 2013, 35(4): 844-847.
- MENG Lina, YU Jing, XU Jing, et al. Enzymatic assisted extraction of volatile oil from *Atractylodes lancea* and its component analysis [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2013, 35(4): 844-847.
- [30] 李晓, 刘艳芳. 酶法提取生姜精油的研究 [J]. 中国调味品, 2009, 34(12): 67-69.
- LI Xiao, LIU Yanfang. Study on extraction of ginger essential oil by enzyme treatment[J]. China Condiment, 2009, 34(12): 67-69.
- [31] SOWBHAGYA H B, SRINIVAS P, PURNIMA K T, et al. Enzyme-assisted extraction of volatiles from cumin (*Cuminum cyminum* L.) seeds[J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1856-1861.

加工编辑: 姚骏

收稿日期: 2021-03-19