超声波-微波处理条件对西兰花泥总酚含量 及其品质的影响

杨静兰^{1,2}, 蔡燕雪^{2*}, 王 弘¹, 王际辉², 杨金易^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院,广州 510642; 2. 东莞理工学院生命健康技术学院, 中国轻工业健康食品开发与营养调控重点实验室,东莞 523808)

摘 要:目的 探讨超声波-微波处理对西兰花泥总酚含量、形貌和流变学等品质特性的影响。**方法** 以西兰 花总酚含量为指标,通过单因素和正交实验对超声波功率、超声时间、微波功率、微波时间进行优化,并对最 优条件下处理的西兰花泥的颜色变化、流变学特性及微观结构进行测定。**结果** 最佳处理条件为:超声功率 120 W、超声时间 1 min、微波功率 280 W、微波时间 60 s。在该处理条件下,西兰花总酚含量为 0.362 mg/g。 经过超声波-微波处理后,西兰花的总颜色变化 Δ*E* 为 4.96,色彩饱和度有所改善。在剪切速率 0.1~100.0 s⁻¹的 范围内未经处理和最优条件制备的西兰花泥样品均表现出剪切稀释现象。动态流变学分析结果表明,经过超 声波-微波处理的西兰花泥在角频率为 0.628~62.800 rad/s 时,储能模量 *G* 和损耗模量 *G* "均随角频率的增加而 增加,*G* 均远大于 *G*",表明西兰花泥呈三维网络状结构,损耗系数 tanδ 均随角频率的增加呈上升趋势,且均小 于 1,表明西兰花泥样品弹性占主导地位,具有类似于凝胶的性质,表现出更滑爽的口感和更好的黏弹性。微 观结果显示,超声波-微波处理使西兰花泥结构变得更加紧密。**结论** 超声波-微波处理有效提高总酚含量的同 时,还可改善西兰花泥的色彩饱和度和质地。本研究可为西兰花的高值化加工提供新方法,为西兰花泥作为新 型食品添加剂辅料提供数据支持。

关键词: 西兰花; 总酚; 超声波-微波辅助; 流变学特性; 微观结构

Effects of ultrasonic-microwave treatment conditions on total phenols and quality of *Brassica oleracea* var. Italica mash

YANG Jing-Lan^{1,2}, CAI Yan-Xue^{2*}, WANG Hong¹, WANG Ji-Hui², YANG Jin-Yi^{1*}

(1. College of Food Science, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China; 2. China National Light Industry Key Laboratory of Healthy Food Development and Nutrition Regulation, School of Life and Health Technology, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of ultrasonic-microwave treatment on the total phenol content and the quality characteristics such as product morphology and rheology of *Brassica oleracea* var. Italica mash. **Methods** The

YANG Jing-Yi, Associate Professor, South China Agricultural University, Wushan No.483, Tianhe District, Guangzhou 510642, China. E-mail: yjy1979@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32001662)、广东省创新强校创新团队项目(2021KCXTD035)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32001662), and the Foundation for Innovation Team in Higher Education of Guangdong, China (2021KCXTD035)

^{*}通信作者:蔡燕雪,副研究员,主要研究方向为生物发酵活性产物的提取与鉴定。E-mail: caiyanxue@dgut.edu.cn

杨金易, 副研究员, 主要研究方向为食品安全、动物疫病等领域的快速检测技术与产品研究。E-mail: yjy1979@163.com

^{*}Corresponding author: CAI Yan-Xue, Associate Professor, Dongguan University of Technology, University Road, No.1, Songshan lake District, Dongguan 523808, China. E-mail: caiyanxue@dgut.edu.cn

single factor and orthogonal experiments were carried out on the four factors affecting the extraction of total phenols from broccoli. The effects of various factors on the extraction of total phenols from broccoli were compared, and the color change, rheological properties and microstructure were determined. Results The best treatment conditions were as follows: Ultrasonic power 120 W, ultrasonic extraction 1 min, microwave power 280 W, microwave treatment 60 s. Under this treatment condition, the extraction amount of total phenols from broccoli was 0.362 mg/g. After ultrasonic-microwave treatment, the total color change ΔE of broccoli was 4.96. In the shear rate range of 0.1–100.0 s⁻¹, the two groups of samples showed shear thinning. The results of dynamic rheological analysis showed that the storage modulus G' and loss modulus G'' increased with the increase of angular frequency when the angular frequency was 0.628-62.800 rad/s, and G' was much larger than G", indicating that the broccoli mud was a three-dimensional network structure. The loss coefficient tan δ increased with the increase of angular frequency and was less than 1, indicating that the elasticity of the broccoli mud sample was dominant and had gel-like properties, it showed a smoother texture and better viscoelasticity. The microscopic results showed that ultrasonic-microwave treatment made the structure of broccoli mud more compact. Conclusion Ultrasonic-microwave treatment can not only effectively improve the total phenol extraction, but also improve the color saturation and texture of broccoli mash. This study can provide a new method for the high-value processing of broccoli, and provide data support for broccoli mud as a new food additive. KEY WORDS: Brassica oleracea var. Italica; total phenol; ultrasonic-microwave assisted; rheological properties;

microstructure

0 引 言

西兰花(Brassica oleracea var. Italica),又称青花菜、 绿花菜等,属于十字花科芸苔属植物^[1],因其形似头冠而 被美誉为"蔬菜皇冠"^[2]。西兰花含有蛋白质、多糖、维生 素 C、硫代葡萄糖苷等物质,营养丰富,具有预防慢性疾 病、防癌、抗癌等作用^[3-6]。除此之外,西兰花中还富含多 酚等种抗氧化活性成分,具有清除机体自由基、延缓衰老 功效^[7-9]。

酚类化合物易溶于甲醇、乙醇等有机溶剂,常用的酚 类物质提取方法包括回流提取法、有机溶剂提取法、超声 辅助提取法、微波辅助提取法、亚临界萃取法等^[10-12]。其 中,超声提取是利用超声波强烈、高速的空化作用和机械 作用将细胞快速破坏^[13],从而缩短功能性成分进入溶剂的 时间^[14],有效避免其抗氧化等生物活性的下降^[15-16];微波 提取则是基于微波能够使水分子或其他极性分子等振动产 生摩擦热,从而实现对物料从内至外进行穿透性加热,具 有节约溶剂、操作快速、安全无污染等优点^[17-18]。文献报 道,采用超声波-微波协同技术提取仙人掌果皮中的黄酮 类物质,最终得率为 14.73 mg/g,与传统水提法进行比较, 含量提高了近 3 倍^[19],具有提取时间短、有效成分提取量 高的优势。

酚类物质作为一种重要的营养保健成分,除具有抗 衰老、抗氧化等作用外,也会对果蔬的滋味、色泽等产生 重要影响^[20-21]。色泽是感官品质指标之一,研究表明,超 声波处理会促进花青素类物质的转化从而提高色泽和营养 品质^[22-23]。值得注意的是,不同提取方式也会影响某 些食品原料的流变性、黏度等理化性质并导致结构的 改变^[24-25],从而影响食品的口感和质地。但目前关于西兰 花的研究主要集中在各种活性成分提取率的提升上,而忽 略了处理方式对西兰花本身的理化性质和结构特性的影 响。因此,本研究以新鲜西兰花为原料,利用超声波-微波 法对西兰花总酚进行处理,以总酚含量为评价指标,在单 因素试验的基础上,进一步运用正交实验设计优化预处理 条件,并对微波或超声处理后的西兰花泥的颜色变化、流 变学特性和微观结构进行研究,以期为西兰花泥作为新型 食品添加剂辅料提供数据支持,为西兰花产品的深度开发 和资源高值化利用提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

西兰花(东莞大岭山市售);没食子酸标准品(纯度 99%)、碳酸钠(分析纯)(上海麦克林生化科技有限公司); Folin-酚试剂[分析纯,索莱宝科技(北京)有限公司];甲醇 [分析纯,富宇精细化工(天津)有限公司]。

1.2 仪器与设备

EVOLUTION 220 紫外-可见分光光度计(美国赛默飞世尔科技公司); P70D20TL-D4 微波炉(广东格兰仕微波生活电器制造有限公司); NH 310 高品便携式电脑色差仪(深圳市三恩驰科技有限公司); MCR 702 流变仪[安东帕(上海)商贸有限公司]; EA-30 Plus 扫描电子显微镜(韩国 Coxem公司); ME104E 万分之一电子分析天平[梅特勒托利多科技

(中国)有限公司]; Smart-Q30 实验室纯水系统(上海和泰仪 器有限公司); JY92-IIN 超声波细胞粉碎机(宁波新芝生物 科技股份有限公司); 3-30KS 冷冻离心机(德国 Sigma 公司); PB9590 破壁机(中国奥克斯集团有限公司); SCIENTZ-18N 冷冻于燥机(宁波新芝生物科技股份有限公司)。

1.3 方 法

1.3.1 西兰花泥的制备

西兰花用水清洗,小花切成 2~3 cm 长,按照西兰花 与水的质量比为 3:2 用破壁机破壁 75 s 得到西兰花泥,用 于超声波-微波预处理。

1.3.2 总酚含量的测定

采用福林酚法测定^[26],称取经过超声波-微波处理后的西兰花泥 5.0 g,加入 25 mL 体积分数为 80%的甲醇溶液,振荡 10 min,4000 r/min 离心 20 min,收集上清液。取 0.25 mL 上清液与 1 mL Folin-酚溶液(1 mol/L)、2 mL 碳酸 钠溶液(7.5 g/100 mL)、3 mL 蒸馏水,用锡纸包住避光反应 1.5 h 后,在 765 nm 波长下测定样品的吸光度值。以没食 子酸浓度为横坐标,吸光度为纵坐标绘制标准曲线,得到 回归曲线方程为 y=5.842x+0.0225, r²=0.999,将测定得到的 吸光度值代入回归曲线方程求出总酚浓度并计算样品的总 酚含量(mg/g)。

1.3.3 单因素实验

称取一定量西兰花泥,采用超声波-微波处理法,分别 考察超声波功率(0、120、240、360、480 W)、超声波处理时 间(0、1、3、5、7 min)、微波功率(0、119、259、280、462 W)、 微波处理时间(0、15、30、45、60 s)对西兰花总酚含量的影 响,先超声波处理,再进行微波处理,单因素实验的基础条 件为超声波功率 240 W、超声波处理时间 3 min、微波功率 119 W、微波处理时间 45 s,每组实验重复 3 次。

1.3.4 正交实验

以单因素实验结果为基础,总酚含量作为考察指标, 采用 L₉(3⁴)正交实验确定总酚的最优处理工艺条件。设置 4 个实验因素,分别为超声波功率(*A*)、超声波处理时间(*B*)、 微波功率(*C*)、微波处理时间(*D*),每个因素设 3 个水平,见 表 1,得出优选组合,从而确定超声波-微波辅助法影响西 兰花中总酚的最佳处理工艺。

	表1 正	交实验因素和	水平
Table 1	Orthogonal	experimental	factors and leve

水平	A 超声波功率 /W	B 超声波时间 /min	C 微波功率 /W	D 微波时间 /s
1	120	1	119	30
2	240	3	259	45
3	360	5	280	60

1.3.5 颜色的测定

将西兰花泥分装至透明真空袋后,用色差仪透过透

明真空袋测定西兰花泥的 CIE 颜色参数 L^* (亮度)、 a^* (绿 色)、 b^* (黄色),实验重复 3 次,结果取平均值,总颜色变化 ΔE 根据式 1 计算。

 $\Delta E = \sqrt{(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2}$ (1)

其中,L、a、b为未处理西兰花泥的颜色参数, L^* 、 a^* 、 b^* 为最佳工艺条件下处理的西兰花泥的颜色参数。

1.3.6 流变学特性的测定

(1)黏度的测定

用流变仪测定西兰花泥的静态黏弹性特征。测试参数: 40 mm 平板转子,测试温度 25℃,测试间距 1 mm,测定样 品在 0.1~100.0 s⁻¹剪切速率范围内的黏度。

(2)储能模量 G'和损耗模量 G''的测定

采用流变仪测定西兰花泥的动态黏弹性特征。测试参数: 40 mm平板转子,振幅值0.1%,剪切角频率0.628~62.800 rad/s, 温度 25℃,测试间距 1 mm,分析样品的 G'、G''及损耗系 数 tan δ 随角频率的变化。

1.3.7 微观结构的测定

使用扫描电子显微镜在 15.0 kV 的电压下获得样品的 颗粒显微照片。在观察之前,分别称取适量未经处理及最 佳预处理条件处理的西兰花泥,放入真空冷冻干燥机中, 进行真空冷冻干燥脱水,其中冷肼温度为-60°C,真空度 为 1.0 Pa,冻干时间 70~72 h,完成后即得到西兰花泥冻干 粉,并将冻干粉少量均匀涂布在导电胶上并在其表面喷涂 金-钯粉 1 min,并在 1000x 的放大倍数下观察西兰花冻干 粉的形态特征^[27]。

1.4 数据处理

所有实验均作3组平行,采用SPSS 25.0软件对实验数 据结果进行单因素方差分析, P<0.05被认为具有统计学意义, Design Expert V8.0.6 软件进行实验设计与优化,由 Origin 2019b进行作图,实验结果以平均值±标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 西兰花总酚提取的单因素实验

单因素实验结果如图 1 所示。由图 1(A)可知,当超声 波功率从 0 W 增加到 240 W 时,西兰花总酚提取量逐渐变 高,但是当超声波功率超过 240 W 的时候,总酚的提取率 却有所下降,原因可能是较高的功率会导致西兰花原料在 超声场中的停留时间减少,从而不能完全发挥超声波的破 壁作用与效果^[28],所以西兰花总酚的提取率降低。根据实 验得到的结果,选择 120、240 和 360 W 的超声波功率进行 下一步的正交实验。

由图 1(B)可知,从0 min 到 3 min,西兰花总酚提取量随着超声波处理时间的增加而不断增加,3 min 时的总酚提取量最高,但当超声波处理时间大于 3 min 时,总酚含量明显降低。这可能是由于 0~3 min 内破壁作用随着延长超

声波处理时间,最终变得更加的充分和剧烈,进而总酚含量有所增加,但当超声波处理时间达到一定程度,增加了其他非酚类化合物的溶出,所以含量下降。因此选择1、3和5min的超声波处理时间进行正交实验。

如图 1(C)所示, 0~259 W 的微波功率范围内, 西兰花总 酚提取量随着微波功率的增大而升高, 微波功率为 259 W 时的总酚提取量最高, 但当微波功率超过 259 W 的时候, 总酚的提取量出现了下降, 可能是因为实验过程中由于微 波功率的增加, 导致溶液萃取体系温度的升高, 溶液中酚 类物质随之释放, 促进物料吸收更多的微波功率, 从而提 取量增大, 但过高又会破坏西兰花总酚物质的结构, 导致 其发生降解甚至变性^[29-30], 使得总酚提取量降低。微波功 率分别按照 119、259 和 280 W 这 3 个水平进行实验。

如图 1(D)所示, 0~15 s 的提取时间内, 西兰花总酚的 提取量随着微波提取时间的延长而明显提高, 提取时间为 45 s时的西兰花总酚提取量最高, 为 0.315 mg/g, 但微波提 取时间超过 45 s时, 西兰花总酚提取量反而降低, 可能是微 波提取时间的延长导致了更多其他非酚类化合物的溶出^[31], 影响了总酚提取量。因此, 45 s 为进行微波处理的最佳时间, 可选择 30、45 和 60 s 的微波处理时间进行正交实验。

2.2 正交实验分析及验证

结合表 2~3 可得, 超声波-微波提取法的各因素对总酚 提取量的影响均达到极显著水平(P<0.01), 影响程度依次为 微波功率>超声波功率=微波处理时间>超声波处理时间。正 交最优组合为 A₁B₁C₃D₃,即超声波功率为 120 W,超声波提 取时间 1 min,微波功率为 280 W,微波提取时间 60 s。根据 上述因素水平进行 4 次验证实验发现,在该最优条件下西兰 花总酚的平均提取量为 0.362 mg/g,均高于单因素组及正交 实验各组的总酚提取量,可应用于西兰花中总酚的提取。

2.3 西兰花泥颜色的变化

西兰花的色泽作为重要的指标,能够用以直观高效 地初步评估其品质。超声波-微波处理前后西兰花泥的颜色 变化如图 2 所示, 由图 2 可知, 两组样品的颜色变化差异 用肉眼较难辨别出来,本研究进一步借助色差仪将颜色参 数量化,结果见表 4。其中, L^* 代表的是亮暗,正值越大,越 偏亮。a*代表的是红绿,负值越小,越偏绿。b*代表的是黄 蓝,正值越大,越偏黄^[32]。由表 4 可知,超声波-微波处理 西兰花泥的 L^* 升高(P<0.01), 说明亮度提高, 这是由于超 声波处理后细胞被破碎,导致孔隙变大,而孔隙越大光折 射作用越强^[33],从而亮度增加。a^{*}为负值,目显著降低,说 明绿度提高,这可能是由于超声使西兰花细胞破裂^[34],使 得更多的叶绿素物质溶出,所以绿度更高。b*为正值,显著 升高,说明黄度提高,这可能是由于微波加热不均匀,样 品产生边效应,局部发生焦化现象导致褐变反应促进色素 的降解^[35],所以导致了黄度增大。 L^* 、 a^* 、 b^* 的变化导致了 ΔE 逐渐增加, 超声波-微波处理后 ΔE 为 4.96, 由此可见, 超声波-微波协同处理可以使西兰花泥的色彩饱和度加强, 颜色更深,改善西兰花泥的成色状态。



衣 2					
Table 2 Analysis of results of orthogonal ultrasonic-microwave assisted extraction					
编号	A/W	B/min	C/W	D/s	总酚提取量/(mg/g)
1	1	1	1	1	0.312
2	1	2	2	2	0.315
3	1	3	3	3	0.348
4	2	1	2	3	0.338
5	2	2	3	1	0.323
6	2	3	1	2	0.300
7	3	1	3	2	0.328
8	3	2	1	3	0.296
9	3	3	2	1	0.292
K_1	0.974	0.978	0.908	0.926	
K_2	0.960	0.933	0.945	0.942	
K_3	0.916	0.939	0.998	0.982	
k_1	0.325	0.326	0.303	0.309	
k_2	0.320	0.311	0.315	0.314	
k_3	0.305	0.313	0.333	0.327	
R	0.019	0.015	0.030	0.019	

表 3 正交实验方差分析结果 Table 3 Analysis of variance in orthogonal experiment					
源	Ⅲ 类 平方和	自由度	均方	F	Р
修正模型	0.009a	8	0.001	616.505	0.000
截距	2.710	1	2.710	1524394.083	0.000
A	0.002	2	0.001	511.583	0.000
В	0.001	2	0.001	331.646	0.000
С	0.004	2	0.002	1153.146	0.000
D	0.002	2	0.001	469.646	0.000
误差	3.200E-05	18	1.778E-06		
总计	2.719	27			
修正后总计	0.009	26			



注: a为未经处理的西兰花泥组; b为正交最优条件处理的西兰花泥。 图 2 西兰花泥颜色的变化 Fig.2 Changes in broccoli mud color

表 4 西兰花泥颜色的变化 Table 4 Change of broccoli mud color

		Change of broccon mud color			
组别	L^{*}	<i>a</i> *	b^{*}	ΔE	
S 1	$54.23{\pm}0.18$	$-11.01{\pm}0.46$	31.64±0.22	/	
S2	$57.52{\pm}0.17^{***}$	$-14.33{\pm}0.26^{***}$	$33.26{\pm}0.31^{**}$	$4.96{\pm}0.66$	

注: S1 表示未经处理的西兰花泥, S2 指正交实验最佳组合处理的 西兰花泥,下同; **或***分别表示显著性 P<0.05 或 P<0.01; /表示 无此项。

2.4 西兰花泥流变学特性的分析

流变学特性是评价食品原料物化性质的重要指标。其 中,黏度是指物质阻止流动、消耗能量的能力。由图 3a 可 知,在同一剪切速率下,两组样品的黏度伴随剪切速率的 逐渐增加都呈现出相应降低的趋势,即为剪切稀释现象, 此类流体受到咀嚼等剪切作用时,在吞咽的过程中产生的 是滑爽的口感而不是黏腻感,符合非牛顿流体的基本特性, 呈现出假塑性行为^[36],这可能是因为随着剪切速率的增大, 西兰花泥大分子链缠结被解开导致分子内部排列趋于更加 规则,因此黏度下降^[37];另一方面可能是因为在静止或剪 切速率较小的情况下,由于西兰花泥中的分子存在大量的 亲水基团,它们能束缚大量自由水,使得流动阻力较强, 从而黏度较大。但随着剪切速率的增大,西兰花泥中的大 分子组分形成外膜,流动阻力减弱,导致黏度降低^[38]。由 此可见,经过超声波-微波处理后的西兰花泥在提高总酚 含量的同时,也可以带来更加滑爽的口感。

模量是指物质阻止变形、储存能量的能力,分为储能 模量(G')和损耗模量(G'')^[39],其与食品的网络结构直接相 关^[40]。G'为储能模量,可以反映西兰花泥的弹性;G"为损 耗模量,表示西兰花泥的黏性。由图 3b~c 可知,在任一相 同频率条件下,两组样品的G'均远大于G",且G'和G"均 随着角频率增大呈上升趋势,这表明西兰花泥呈三维网络 状结构,属于稳定性较高的高弹性类固体,这可能与西兰 花的微观三维网状结构、官能团的种类、交联的程度以及 聚合度高低等相关^[36]。损耗系数 tanδ 能够反映西兰花泥的 综合黏弹性。由图 3d 可知,各西兰花泥样品的 tanδ 均随角 频率的增加而呈现增加的趋势,且均小于1,表明西兰花 泥样品弹性占主导地位,具有类似于凝胶的性质^[41]。由此 可见,经过超声波-微波处理后,西兰花泥表现出更好的黏 弹性的质地。

2.5 西兰花泥微观结构的分析

西兰花泥冻干粉的微观结构如图 4 所示。与未经处理 的西兰花泥相比,超声波-微波处理对西兰花的形态和结 构存在显著差异。未经处理的西兰花泥由于被破壁而造成 了植物细胞结构的破坏,表面结构主要以网状聚集片段的 形式存在;经过超声波-微波处理后,西兰花表面三维网状 结构更加明显,呈现出连续而紧密的聚集体状态。这是由 于超声处理产生的空化效应和机械振动及微波的热效应



图 3 超声波-微波处理对西兰花泥流变学特性的影响 Fig.3 Effecta of ultrasound-microwave treatment on the rheological properties of broccoli mud



注: (A)为未经处理的西兰花泥; (B)处理后西兰花泥。 图 4 超声波-微波处理对西兰花泥微观结构的影响 Fig.4 Effects of ultrasonic-microwave treatment on microstructure of broccoli mulay

导致西兰花分子间的交联更加紧密,结构更加稳定^[42],可见,超声波-微波处理对西兰花的微观结构有重要影响,可

以得到较均匀紧密的结构。因此, 西兰花的结构在适度的 超声波-微波处理下可以得到一定的改良。

3 结 论

本研究通过单因素和正交实验,得出西兰花总酚 最佳提取条件为:超声波功率 120 W、超声波提取时间 1 min、微波功率 280 W、微波提取时间 60 s,此条件下提 取量为 0.362 mg/g。经超声波-微波协同处理后,西兰花泥 色彩饱和度提高,改善成色状态,同时表现出剪切稀释的 现象以及更好的黏弹性质地,得到更均匀紧密的微观结 构。综上可知,超声波-微波辅助处理在有效提高总酚含量 的同时,还可在一定程度上改善西兰花泥本身颜色与质地 等品质,为西兰花资源高值化加工提供新了方法。后续可 以进一步深化探讨加工工艺引起产品品质变化的机制,为 西兰花在不同加工单元中的品质变化提供理论依据。

参考文献

- 王娟,肖亚冬,徐亚元,等. 不同预处理方式对花椰菜干制品品质影响 研究[J]. 食品工业科技,2020,41(24): 36–43.
 WANG J, XIAO YD, XU YY, *et al.* Effect of different pretreatment methods on the quality attributes of dried cauliflower [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(24): 36–43.
- [2] 姚镭栓. 预处理、冻藏及解冻方法对速冻青花菜营养品质的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2014.

YAO LS. Effects of preprocessing, frozen storage and thawing methods on nutrition quality of frozen broccoli [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

33(20): 299-303

- [3] 林本芳, 鲁晓翔, 李江阔, 等. 低温驯化结合冰温贮藏对西兰花品质的 影响[J]. 食品科学, 2012, 33(20): 299–303.
 LIN BF, LU XX, LI JK, *et al.* Effect of cold acclimation combined with ice-temperature storage on the quality of broccolis [J]. Food Sci, 2012,
- [4] FERREIRA SS, MONTEIRO F, PASSOS CP, et al. Blanching impact on pigments, glucosinolates, and phenolics of dehydrated broccoli by-products [J]. Food Res Int, 2020, 132: 109055.
- [5] FERREIRA SS, PASSOS CP, CARDOSO SM, et al. Microwave assisted dehydration of broccoli by-products and simultaneous extraction of bioactive compounds [J]. Food Chem, 2018, 246: 386–393.
- [6] ZARE M, ROSHAN ZN, ASSADPOUR E, et al. Improving the cancer prevention/treatment role of carotenoids through various nano-delivery systems [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2021, 61, 522–534.
- [7] 杨华,杨性民,孙金才.不同干燥方式对西兰花蔬菜粉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2013, (7): 152–158.
 YANG H, YANG XM, SUN JC. Effect of different drying methods on vegetable powder quality of the broccoli (*Brassica oleracea*) [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2013, (7): 152–158.
- [8] 谢晓宇,张飞,石洁,等.预冷处理结合低温贮藏对西兰花贮藏品质的 影响[J]. 食品工业科技,2021,42(7):302–310.
 XIE XY, ZHNAG F, SHI J, *et al.* Effect of pre-cooling treatment and low temperature storage on storage quality of broccoli [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(7): 302–310.
- [9] TIAN M, XU X, LIU Y, et al. Effect of Se treatment on glucosinolate metabolism and health-promoting compounds in the broccoli sprouts of three cultivars [J]. Food Chem, 2016, 190, 374–380.
- [10] SRIDHAR A, PONNUCHAMY M, KUMAR PS, et al. Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: A review[J]. Environ Chem Lett, 2021, 19(4): 3409–3443.
- [11] CALDERÓN-OLIVER M, PONCE-ALQUICIRA E. Environmentally friendly techniques and their comparison in the extraction of natural antioxidants from green tea, rosemary, clove, and oregano [J]. Molecules: Basel, Switzerland, 2021, 26(7): 1869.
- [12] DAGHAGHELE S, KIASAT AR, SAFIEDDINARDEBILI SM, et al. Intensification of extraction of antioxidant compounds from Moringa oleifera leaves using ultrasound-assisted approach: BBD-RSM design [J]. Int J Fruit Sci, 2021, 21(1): 693–705.
- [13] 石畅,高畅,郭晓瑞,等. 层次分析-熵权法结合响应面法优化五味子 藤茎木脂素超声提取工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 293-302.

SHI C, GAO C, GUO XR, *et al.* Optimization of ultrasonic extraction process of lignans from *Schisandra chinensis* vine stem by analytic hierarchy process-entropy weight method combined with response surface methodology [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(12): 293–302.

- [14] 吕艳伟,王光全,孟庆杰,等. 干旱对毛白杨不同品种幼苗生长和抗氧 化系统的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2013, (6): 60-64.
 LV YW, WANG GQ, MENG QJ, *et al.* Effects of drought on seedlings growth and antioxidant system of different varieties of *Populus* tomento sacarr [J]. Heilongjiang Agric Sci, 2013, (6): 60-64.
- [15] 丁建英, 王晓飞, 张丽, 等. 枇杷叶多酚超声波辅助提取工艺优化及其 抗氧性分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(2): 340–347.

DING JY, WANG XF, ZHANG L, *et al.* Ultrasonic assisted extraction of polyphenol from loquat leaves and its antioxidant activity [J]. J South Agric, 2018, 49(2): 340–347.

- [16] 王翔,彭胜,彭密军. 杜仲叶总多酚超声波-微波辅助提取及其抗氧化 活性研究[J]. 林产化学与工业, 2018, 38(5): 85-92.
 WANG X, PENG S, PENG MJ. Extraction of total polyphenols from *Eucommia ulmoides* oliver leaves assisted by ultrasound-microwave and their antioxidant activity [J]. Chem Ind Forest Prod, 2018, 38(5): 85-92.
- [17] 刘志聪,郑丹萍. 微波辅助法提取潮州柑橘皮中总黄酮的工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(23): 188–191.
 LIU ZC, ZHENG DP. Study on microwave-assisted extration of total flavonoids from Chaozhou citrus peel [J]. J Anhui Agric Sci, 2021, 49(23): 188–191.
- [18] 彭腾,韩笑. 一种黄精面条及其制备方法: 中国, CN201810671926.1 [P].
 2018-12-07.

PENG T, HAN X. A yellow essence noodle and its preparation method: CN: 201810671926.1 [P]. 2018-12-07.

- [19] 于淑池,肖陈媛. 基于超声微波协同萃取法的仙人掌果皮黄酮提取工 艺[J]. 海南热带海洋学院学报, 2020, 27(2): 105–110.
 YU SC, XIAO CY. Extraction process of flavonoids from cactus peel by ultrasound-microwave synergistic extraction [J]. J Hainan Trop Ocean Univ. 2020, 27(2): 105–110.
- [20] 黄春辉,廖光联,谢敏,等.不同猕猴桃品种果实发育过程中总酚和类 黄酮含量及抗氧化活性的动态变化[J].果树学报,2019,36(2): 174-184.

HUANG CH, LIAO GL, XIE M, *et al.* Dynamic changes in total phenols, flavonoids and antioxidant capacity during fruit development of different kiwifruit cultivars [J]. J Fruit Sci, 2019, 36(2): 174–184.

- [21] 秦晨亮,丁玲,代红军.赤霞珠葡萄果实发育过程中酚类物质含量与相关酶活性的关系[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(11): 1922–1926.
 QIN CL, DING L, DAI HJ. Relationship between phenolic substance content and related enzymes activities during the development of Cabernet Sauvignon grape berries [J]. Acta Agric Zhejiangensis, 2015, 27(11): 1922–1926.
- [22] 雷昌贵,孟宇竹,陈锦屏,等. 超声波处理对桑葚酒色泽、花青素含量及抗氧化能力的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(12): 44–50.
 LEI CG, MENG YZ, CHEN JP, *et al.* Effects of ultrasonic treatment on color, anthocyanin content, and antioxidant capacity of mulberry wine [J]. Food Res Dev, 2023, 44(12): 44–50.
- [23] LUKIC K, BRNCIC M, CURKO N, et al. Effects of high power ultra-sound treatments on the phenolic, chromatic and aroma composition of young and aged red wine [J]. Ultrason Sonochem, 2019, 59: 104725.
- [24] CHEN JH, ZHANG X, CHEN X, et al. Phenolic modification of myofibrillar protein enhanced by ultrasound: The structure of phenol matters [J]. Food Chem, 2022, 386: 132662.
- [25] AHMAD A, ANJUM FM, ZAHOOR T, et al. Beta glucan: A valuable functional ingredient in foods [J]. Crit Rev Food Sci, 2012, 52(3): 201–212.
- [26] AINSWORTH EA, GILLESPIE KM. Estimation of total phenoliccontent and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent [J]. Nat Protoc, 2007, 2(4): 875–877.
- [27] 魏君慧,薛媛,冯莉,等. 杏鲍菇分离蛋白和清蛋白的理化性质及功能 分析[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 54-60.

WEI JH, XUE Y, FENG L, *et al.* Physicochemical and functional properties of *Pleurotus eryngii* protein isolate and albumin [J]. Food Sci, 2018, 39(18): 54–60.

- [28] 杨艳,周欣,陈华国. 仙人掌多糖提取、纯化、结构表征及生物活性研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 216–225.
 YANG Y, ZHOU X, CHEN HG. Research progress on extraction, purification, analysis and biological activity of polysaccharides from *Opuntia dillenii* Haw [J]. Food Mach, 2022, 38(5): 216–225.
- [29] 田明杰,谭宏渊,叶帆宇,等. 福白菊总黄酮的微波辅助提取工艺优化 及其抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(1): 170–174.
 TIAN MJ, TAN HY, YE FY, *et al.* Optimization of microwave-assisted extraction process of total flavonoids from *Chrysanthemum morifolium* and its antioxidant activity [J]. China Brew, 2020, 39(1): 170–174.
- [30] 李乐,陈本寿,袁莹. 无花果多糖的微波提取工艺优化[J]. 现代食品 科技, 2021, 37(12): 215–220.
 LI L, CHEN BS, YUAN Y. Optimization of microwave extraction of *Ficus carica* polysaccharide [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(12): 215–220.
- [31] 梁彬,宿婧,唐宽刚. 微波辅助提取藜麦种子中总黄酮工艺的优化[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2017, 30(2): 171–176.
 LIANG B, SU J, TANG KG. Optimization of microwave extraction of total flavonoids from seeds of *Chenopodium quinoa* willd [J]. J Hainan Norm Univ (Nat Sci), 2017, 30(2): 171–176.
- [32] 郭燕,张树航,李颖,等. 板栗叶片颜色最佳色差仪参数确定[J]. 河北 农业科学, 2021, 25(6): 51-54.
 GUO Y, ZHANG SH, LI Y, *et al.* Determination of optimum colorimeter parameters of chestnut leaves color [J]. J Hebei Agric Sci, 2021, 25(6): 51-54.
- [33] 张馨月,曹雪慧,励建荣,等.预脱水对冷冻干燥胡萝卜片品质的影响[J].
 中国调味品, 2023, 48(3): 1–5.
 ZHANG XY, CAO XH, LI JR, *et al.* Effect of pre-dehydration on the quality of freeze-dried carrot slices [J]. China Cond, 2023, 48(3): 1–5.
- [34] 曹楠楠, 陈香荣, 吴艳. 苦豆子多糖的超声波提取工艺优化及理化性质研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(2): 209–215, 99.
 CAO NN, CHEN XR, WU Y. Optimization of ultrasonic extraction and physiochemical characteristics of polysaccharides from *Sophora alopecuroides* seeds [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(2): 209–215, 99.
- [35] 唐小闲, 陈海荣, 任爱清, 等. 不同干燥方法对三华李片干燥特性及营养成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(24): 42–50.
 TANG XX, CHEN HR, REN AIQ, *et al.* Effects of different drying methods on the drying characteristics and nutrient quality of Sanhua plum slices [J]. Food Res Dev, 2022, 43(24): 42–50.
- [36] 马之原,朱科学,吴桂萍,等. 菠萝蜜多糖流变学特性研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 81-86.
 MA ZY, ZHU KX, WU GP, et al. Rheological properties of polysaccharide from Artocarpus heterophyllus lam. Pulp [J]. Sci Technol Food Ind, 2021,

42(23): 81-86.

- [37] 汪海波, 徐群英, 刘大川, 等. 燕麦 β-葡聚糖的流变学特性研究[J]. 农业工程学报, 2008, (5): 31–36.
 WANG HB, XU QY, LIU DC, *et al.* Rheological properties of β-glucans from oats [J]. Chin Soc Agric Eng, 2008, (5): 31–36.
- [38] 管骁,姚惠源. 燕麦β-葡聚糖流变特性的测定[J]. 中国粮油学报, 2003,
 (3): 28-31.

GUAN X, YAO HY. Rheological properties of oat β -glucan solution [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2003, (3): 28–31.

- [39] BRIGHENTI M, GOVINDASAMYL S, JAEGGI JJ, et al. Behavior of stabilizers in acidified solutions and their effect on the textural, rheological, and sensory properties of cream cheese [J]. J Dairy Sci, 2020, 103(3): 2065–2076.
- [40] YU C, GUNASEKARAN S. A systems analysis of Pasta filata process during Mozzarella cheese making [J]. J Food Eng, 2005, 69(4): 399–408.
- [41] ROMÁN L, MARTÍNEZ MM, ROSELL CM, et al. Changes in physicochemical properties and, in vitro, starch digestion of native and extruded maize flours subjected to branching enzyme and maltogenic α-amylase treatment [J]. Int J Biol Macromol, 2017, 101: 326–333.
- [42] 望运滔,王营娟,田金风,等.高强度超声对鹰嘴豆分离蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 9–14, 71.
 WANG YT, WANG YJ, TIAN JF, *et al.* Effect of high intensity ultrasound on structural and functional properties of chick pea protein isolate [J]. Food Mach, 2020, 36(8): 9–14, 71.

(责任编辑: 郑 丽 韩晓红)

作者简介



杨静兰,硕士研究生,主要研究方向 为食品分析。 E-mail: Chinglan955@163.com



蔡燕雪,副研究员,主要研究方向为 生物发酵活性产物的提取与鉴定。 E-mail: caiyanxue@dgut.edu.cn



杨金易,副研究员,主要研究方向为 食品安全、动物疫病等领域的快速检测技术 与产品研究。 E-mail: yjy1979@163.com