

响应面法优化微波钝化玛咖黑芥子酶活

涂行浩, 张弘*, 郑华, 甘瑾, 徐珑峰, 李坤

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 国家林业局资源昆虫培育与利用重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要: 探讨微波处理在钝化玛咖黑芥子酶相对酶活研究中的应用。通过单因素试验考察微波强度、处理时间以及料液比 3 个主要因素对玛咖黑芥子酶相对酶活和芥子油苷的影响。以黑芥子酶相对酶活为响应值, 进行响应面分析和优化, 建立微波钝化玛咖黑芥子酶相对酶活的回归模型。结果显示: 在微波强度 14W/g、料液比 2:1(g/mL)条件下对冰鲜玛咖处理 60s, 玛咖黑芥子酶相对酶活几乎完全丧失。与传统热水烫漂相比, 在有效钝化黑芥子酶相对酶活的前提下, 玛咖芥子油苷损失率下降 28%, VC 损失率下降 21%, 蛋白质含量无显著变化。

关键词: 玛咖; 微波钝化; 黑芥子酶; 烫漂; 芥子油苷; 响应面分析

Optimization of Microwave Inactivation of Myrosinase Activity in Maca by Response Surface Methodology

TU Xing-hao, ZHANG Hong*, ZHENG Hua, GAN Jin, XU Long-feng, LI Kun

(Key Laboratory of Cultivation and Utilization of Resources Insects, State Forestry Administration, Research Institute of Resources Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, China)

Abstract The purpose of the present study was to explore the application of microwave to inactivate myrosinase in maca. One-factor-at-a-time experiments were carried out to investigate the effects of microwave intensity, treatment time and material-to-liquid ratio on the residual activity of myrosinase and glucosinolate content. Response surface methodology was employed to optimize the operating parameters based on the residual activity of myrosinase. A regression model that describes the residual activity of myrosinase as a function of the operating parameters was established. The results showed that myrosinase in maca almost lost all of its activity under the conditions: microwave intensity 14 W/g, material-to-liquid ratio 2:1, and treatment time 60 s. In addition to effectively inactivating myrosinase, the microwave treatment resulted in a decrease of 28% and 21% in glucosinolate and VC contents, respectively compared with the traditional hot water blanching time, but had little effect on protein content.

Key words: maca; microwave inactivation; myrosinase; blanching; glucosinolates; response surface methodology (RSM)

中图分类号: TS201.1; S205.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)04-0122-06

玛咖(*Lepidium meyenii* Walp.)为十字花科植物, 原产于秘鲁海拔 3500m 以上安第斯高寒山区, 其作为药食兼用的植物已有悠久的历史。大量研究表明, 玛咖具有抗疲劳、改善性功能、减少前列腺增生等多种功效, 且无毒、食用安全^[1-2]。多数研究者认为玛咖酰胺、苜基芥子油苷及其分解产物异硫氰酸苜酯为其主要活性成分及特征物质, 且大量研究表明芥子油苷及异硫氰酸酯类物质具有抗肿瘤、提高生育力等功效, 应在加工过程中尽量保留^[3-5]。而商业化玛咖干粉的芥子油苷含量非常低, 这是因为十字花科植物中含有一种特有的底物酶系统: 芥子油苷-黑芥子酶系统, 在玛咖干燥和制粉的过程中, 芥子油苷与黑芥子酶直接接触, 并使芥子油

苷水解为异硫氰酸、腈等刺激性气味物质。因此, 在玛咖加工时为尽可能保留更多的芥子油苷, 同时减少不良风味成分的产生, 就必须有效抑制和钝化黑芥子酶相对酶活^[6-9]。

微波处理作为一种新兴钝酶技术在国内外均有相关研究^[10-13], 其作用机理是基于微波的热效应和非热生化效应。热效应是指微波作用于物料, 使物料表里同时吸收微波能, 温度升高后使生物体内蛋白质、核酸等分子变性, 导致失活, 从而达到灭酶的目的。非热生化效应主要是指在外电磁场的作用下物料中细胞膜发生功能障碍, 使细胞正常代谢功能受到干扰和破坏, 致使细胞 DNA 和 RNA 分子结构中的氢键松弛、断裂和重

收稿日期: 2011-06-14

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201004028)

作者简介: 涂行浩(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为天然资源化学与利用。E-mail: tuxinghao@126.com

* 通信作者: 张弘(1963—), 男, 研究员, 学士, 研究方向为林业生物资源化学与利用。E-mail: kmzhong@163.com

新组合、诱发基因突变、染色体畸变,从而中断细胞的正常功能,最终导致酶活力下降^[14]。本实验采用微波对冰鲜玛咖切片进行短时间处理,以期对玛咖的黑芥子酶灭活及后续加工提供一定的指导依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

冰鲜玛咖由中国林业科学院资源昆虫研究所滇中高原试验站提供。

黑芥子硫苷酸钾(sinigrin)(纯度 $\geq 99.0\%$) 美国Sigma公司;氯化钡、醋酸铅、羧甲基纤维素钠、考马斯亮蓝 G-250、草酸、磷酸氢二钠、柠檬酸、抗坏血酸(VC)、2,6-二氯靛酚钠均为分析纯。

1.2 仪器与设备

MAS-I 型常压微波萃取仪 上海新仪微波化学科技有限公司;DU800 型紫外-可见分光光度计 美国贝克曼库尔特有限公司;MM400 型冷冻混合球磨仪 德国 Retsch 公司;BCD-539WT 冰箱 青岛海尔股份有限公司;AB204-S 精密型电子天平、HR83-P 型快速卤素水分测定仪 Mettler Toledo(中国)有限公司;TY742X2A 纯水机 美国 Barnstead 公司;Z323K 通用型高速冷冻离心机 德国 Hermie 公司;DYQ-401B 参茸中药切片机 瑞安市永历制药机械有限公司;HH-6 型数显恒温水浴锅 常州澳华科技有限公司;10~1000 μ L 手动可调量程单道移液器 德国 Eppendorf 公司;透析袋(截留分子质量为 8000~14000D) 国药集团化学试剂有限公司。

1.3 方 法

1.3.1 玛咖微波处理工艺

从 -5°C 冰箱取出的鲜玛咖,自然解冻 30min 后,用中药切片剂低温均匀切片(3mm),放置于 4°C 冰箱恒温 2h,每份称取玛咖片(50 ± 0.5)g,置于微波炉专用盒中。为使微波处理过程中温度分布更为均匀,防止玛咖在微波场中焦化,且增大湿度有利于灭菌和钝化酶,按试验设计要求加入一定比例的纯水^[15]。然后将装有物料的微波炉专用盒放入微波萃取仪内进行微波处理,处理结束后置于 0°C 冰箱冷却待测(6h 内测定)。每组实验重复 3 次。

1.3.1.1 微波强度对玛咖黑芥子酶相对酶活及芥子油苷含量的影响

在料液比 2:1(g/mL)时,按微波强度 8、10、12、14、16W/g 对玛咖处理 60s,考察不同微波强度对玛咖黑芥子酶相对酶活及芥子油苷含量的影响。

1.3.1.2 微波时间对玛咖黑芥子酶相对酶活及芥子油苷含量的影响

在微波强度 12W/g、料液比 2:1(g/mL)时,对玛咖

分别处理 40、50、60、70、80s,考察不同微波时间对玛咖黑芥子酶相对酶活及芥子油苷含量的影响。

1.3.1.3 料液比对玛咖黑芥子酶相对酶活及芥子油苷含量的影响

在微波强度 12W/g、微波时间 60s 时,在料液比分别为 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1(g/mL)条件下对玛咖进行微波处理,考察不同料液比对玛咖黑芥子酶相对酶活及芥子油苷含量的影响。

1.3.2 玛咖热水烫漂

取 300mL 蒸馏水于 500mL 烧杯中,煮沸,将 50g 玛咖原料投入其中,烫漂时间依次为 30、60、90、120、150s,每组试验重复 3 次。

1.3.3 黑芥子酶相对酶活性的测定^[16-17]

取玛咖样品 10g,放入冷冻混合球磨仪中,加 20mL 预冷的磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液(pH6.0),研磨 3min, 4°C 浸提 30min,然后用缓冲液再浸提 2 次,并定容至 50mL,取 6mL 离心(4°C 、10000r/min、15min),上清液转入透析袋(8000~14000D), 4°C 在缓冲液中(pH6.0)透析 24h 后测定酶相对酶活。

使用紫外分光光度法测定玛咖黑芥子酶相对酶活。用黑芥子硫苷酸钾做底物,在 227nm 处测黑芥子硫苷酸钾的浓度,使用 3.2mL 反应液,其中透析后的酶提取液、2.0mL 缓冲液(pH6.0)和 0.2mL 黑芥子硫苷酸钾底物(2mmol/L)的混合液分别在 37°C 水浴恒温 10min,将缓冲液与底物混合液缓慢倒入石英比色皿,用移液枪迅速加入 1.0mL 酶提取液,用紫外-可见分光光度计于 227nm 波长处测初始 1min 内吸光度变化 ΔA ,酶比活力单位(U/g)定义以每克样品每分钟 0.001 吸光度的变化来表示。将未处理鲜玛咖黑芥子酶活定为 100%(324U/g),其他条件处理后的酶比活力与其相比较计算其相对酶活,重复 3 次^[18-19]。

1.3.4 营养成分测定

芥子油苷:采用氯化钡法^[20]测定;VC:采用 2,6-二氯靛酚法^[15]测定;蛋白质:采用考马斯亮蓝法^[21]测定。

1.3.5 微波处理对玛咖黑芥子酶相对酶活影响条件的优化

表 1 响应面分析因素与水平表

Table 1 Coded values and corresponding actual values of the optimization parameters used in response surface analysis

因素	编码水平				
	$-r(-1.68)$	-1	0	1	$r(1.68)$
微波强度/(W/g)	8.6	10	12	14	15.4
微波时间/s	43.2	50	60	70	76.8
料液比(g/mL)	1.2	1.5	2	2.5	2.8

在单因素试验基础上,利用 Design-expert 7.1.3 软件,采用中心组合试验设计(central composite design,

CCD), 以影响黑芥子酶相对酶活的 3 个主要因素微波强度、微波时间和料液比为响应变量, 分别用 *A*、*B* 和 *C* 来表示, 玛咖黑芥子酶相对酶活 *Y* 为响应值进行响应面优化, 试验因素水平设计见表 1。

2 结果与分析

2.1 微波处理对玛咖黑芥子酶相对酶活及芥子油苷的影响

2.1.1 微波强度的影响

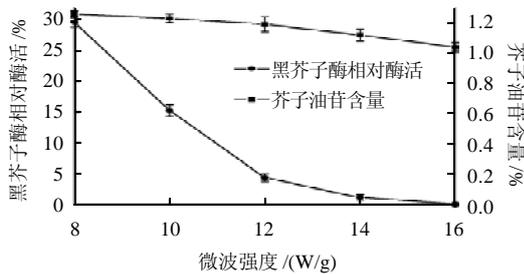


图1 微波强度对玛咖黑芥子酶相对酶活和芥子油苷含量的影响
Fig.1 Effect of microwave intensity on the residual activity of myrosinase and glucosinolate content

由图 1 可见, 玛咖黑芥子酶相对酶活随微波强度的增加而快速降低, 芥子油苷的含量也逐渐下降。当微波强度为 16W/g 时, 玛咖黑芥子酶相对酶活几乎完全丧失, 此时芥子油苷含量为 1.04%, 说明玛咖黑芥子酶在微波处理条件下较易失活, 但同时也导致了部分芥子油苷的分解。微波强度过大, 虽然能完全钝化黑芥子酶相对酶活, 但使部分玛咖切片表面发生焦化, 且产生一些不良异味, 芥子油苷含量也随之进一步减少, 微波处理强度过小, 玛咖黑芥子酶相对酶活依然较高, 灭酶效果不明显, 综合考虑选择微波强度 10~14W/g 为优化水平。

2.1.2 微波时间的影响

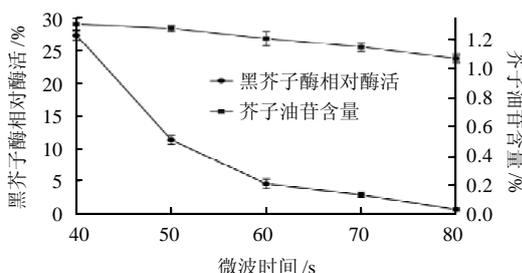


图2 微波时间对玛咖黑芥子酶相对酶活和芥子油苷含量的影响
Fig.2 Effect of microwave treatment time on the residual activity of myrosinase and glucosinolate content

由图 2 可知, 随微波时间的延长, 玛咖黑芥子酶相对酶活下降明显, 随着热累积性的增加, 芥子油苷含量也缓慢下降。若微波处理时间较短, 玛咖黑芥子酶相对酶活仍保持在一个较高水平, 处理时间过长, 虽然玛咖黑芥子酶相对酶活被有效抑制, 但芥子油苷含量持续下降, 其他营养成分如热敏感性的 VC 也可能会大量损失, 例如当微波时间为 80s 时, 玛咖黑芥子残余酶相对酶活为 0.63%, 芥子油苷含量下降到 1.07%。因此选择微波处理时间在 50~70s 较为合适。

2.1.3 料液比的影响

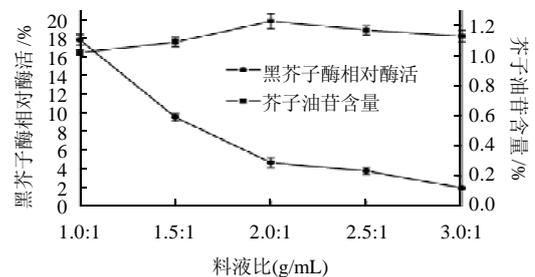


图3 料液比对玛咖黑芥子酶相对酶活和芥子油苷含量的影响
Fig.3 Effect of material-to-liquid ratio on the residual activity of myrosinase and glucosinolate content

由图 3 可知, 随着料液比的增加, 玛咖黑芥子酶相对酶活逐渐降低, 超过 2:1(g/mL) 时, 相对酶活下降缓慢; 芥子油苷也存在不同程度的损失, 保留含量呈先上升后下降的趋势, 在料液比为 2:1(g/mL) 时芥子油苷的损失最少。料液比为 1:1(g/mL) 时, 玛咖黑芥子酶相对酶活被钝化的程度较小, 原因可能是微波能主要被水等极性组分吸收, 钝化酶相对酶活主要靠微波的热效应^[22], 短时间内效果不是很明显, 而且加入过多的水可能导致一部分芥子油苷被微波提取进入水中。料液比为 3:1(g/mL) 时, 玛咖黑芥子酶相对酶活钝化程度较大, 但微波场温度分布不均匀现象很明显, 影响了灭酶均匀性, 同时可能由于温度上升较快, 部分芥子油苷受高温被分解, 玛咖切片表面也发生了焦化现象。因此综合考虑料液比选择在 2:1(g/mL) 左右较佳。

2.2 微波处理玛咖黑芥子酶相对酶活工艺参数的响应面优化^[23]

2.2.1 工艺模型建立及其显著性检验

结合单因素试验结果, 按 CCD 试验方案进行三因素三水平试验, 所得结果见表 2。将所得的试验数据用 Design Expert 软件进行多元回归拟合, 得到以玛咖黑芥子酶相对酶活为目标函数的二次多项回归方程:

$$Y = 4.79 - 7.5A - 5.86B - 2.11C + 0.45AB + 0.73AC + 1.24BC + 3.66A^2 + 2.8B^2 + 1.48C^2 \quad (1)$$

由回归方程可知,微波强度和微波时间两线性项、微波时间与料液比的交互项及微波强度的二次项对黑芥子酶相对酶活影响较大。

表2 中心组合试验设计及结果

Table 2 Central composite experimental design and results for response surface analysis

标准序	运行序	因素			黑芥子酶相对酶活/%	
		A	B	C	试验值	预测值
11	1	0	-1.68	0	20.86	22.56
1	2	-1	-1	-1	31.68	30.63
14	3	0	0	1.68	4.63	5.43
13	4	0	0	-1.68	11.36	12.51
3	5	-1	1	-1	15.26	15.51
5	6	-1	-1	1	22.67	22.46
4	7	1	1	-1	1.15	-0.024
10	8	1.68	0	0	0.72	2.54
15	9	0	0	0	4.21	4.79
2	10	1	-1	-1	14.32	13.25
8	11	1	1	1	0	-0.31
7	12	-1	1	1	12.63	12.32
19	13	0	0	0	5.35	4.79
6	14	1	-1	1	9.65	8.02
16	15	0	0	0	4.57	4.79
9	16	-1.68	0	0	27.62	27.75
17	17	0	0	0	4.86	4.79
20	18	0	0	0	4.93	4.79
12	19	0	1.68	0	2.61	2.86
18	20	0	0	0	5.18	4.79

为检验方程的有效性,对上述回归模型进行方差分析(表3),结果表明模型极显著($P < 0.0001$),回归方程失拟检验显著($P = 0.0035$),说明模型拟合度良好,同时回归模型的调整决定系数为0.9815。表明黑芥子酶相对酶活的实测值与预测值之间具有较好的拟合度,较好地反应了玛咖微波处理黑芥子酶相对酶活与微波强度、微波时间、料液比的关系。因此所得的回归方程能较好地预测玛咖黑芥子酶相对酶活与各参数的变化关系。

表3 玛咖黑芥子酶相对酶活回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance for the fitted regression model for the residual activity of myrosinase

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值
回归模型	1605.39	9	178.38	113.24	< 0.0001
残差	15.75	10	1.58		
失拟	14.9	5	2.98	17.46	0.0035
纯误差	0.85	5	0.17		
总误差	1621.15	19			

注:模型的决定系数为0.9903,调整决定系数为0.9815。

从表4回归方程系数检验可知,模型(1)的一次项A、B极显著,C显著;交互项AB、AC均不显著,

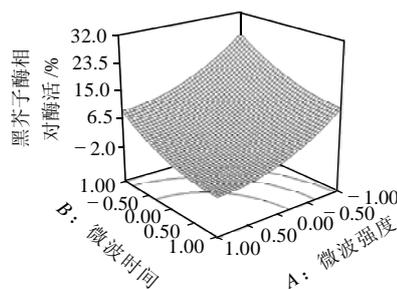
BC显著;二次型 A^2 、 B^2 均极显著, C^2 显著。

表4 玛咖黑芥子酶相对酶活回归方程系数显著性检验

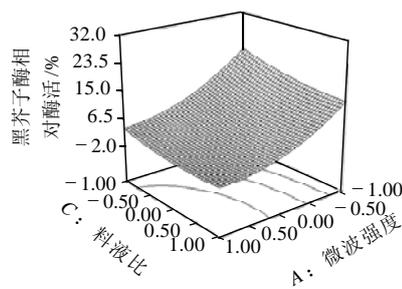
Table 4 Statistical significance of each coefficient in the fitted regression model for the residual activity of myrosinase

模型中的系数项	系数估计值	自由度	标准误差	95%置信度区间低端值	95%置信度区间高端值	P值
常数项	4.79	1	0.51	3.65	5.93	
A	-7.5	1	0.34	-8.25	-6.74	< 0.0001
B	-5.86	1	0.34	-6.61	-5.1	< 0.0001
C	-2.11	1	0.34	-2.86	-1.35	0.0001
AB	0.45	1	0.44	-0.53	1.44	0.3294
AC	0.73	1	0.44	-0.26	1.72	0.1322
BC	1.24	1	0.44	0.25	2.23	0.0192
A^2	3.66	1	0.33	2.92	4.4	< 0.0001
B^2	2.8	1	0.33	2.06	3.54	< 0.0001
C^2	1.48	1	0.33	0.74	2.21	0.0012

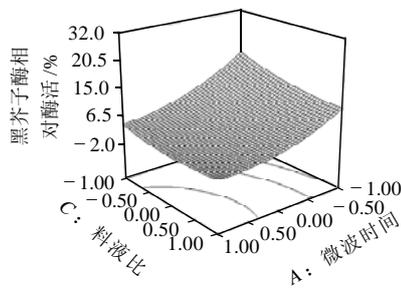
2.2.2 响应面分析及最优条件的确定



a.微波强度和微波时间



b.微波强度和料液比



c.微波时间和料液比

图4 各因素交互作用对玛咖黑芥子酶相对酶活的影响
Fig.4 Response surface plots showing the interaction effects of treatment conditions on the residual activity of myrosinase

根据回归方程作出模型的响应曲面及等高线见图4, 3组图比较直观地反映了各因素对玛咖黑芥子酶相对酶活的影响。从图4可知, 各因素中以微波强度对玛咖黑芥子酶相对酶活影响最大, 其次是微波时间和料液比。微波强度和微波时间对黑芥子酶相对酶活有非常明显的交互作用, 即玛咖黑芥子酶相对酶活在高微波强度、长时间条件下降低显著, 如在微波强度16W/g、处理80s时, 黑芥子酶相对酶活已经完全丧失。由于本实验主要目的在于短时间内最大程度的钝化玛咖黑芥子酶相对酶活, 通过软件分析, 得到较佳的微波处理条件为微波强度13.96W/g、微波处理时间63.04s、料液比2:1(g/mL), 此时玛咖黑芥子酶相对酶活达到最低值。

2.3 验证实验

为检测响应面法所得结果的可靠性, 进行3次验证实验, 由于微波反应萃取仪档距为100W, 只能以2W/g为间隔来调整微波强度, 所以在上述优化条件下, 调整微波强度14W/g、处理时间60s、料液比2:1(g/mL), 实际测得的平均相对酶活为1.07%, 与理论值0.96%相差不大, 说明该方程与实际情况拟合良好, 证明用响应面法预测微波处理玛咖黑芥子酶相对酶活的影响可行。

2.4 微波处理与热水烫漂比较实验^[24]

表5 微波处理与热水烫漂对玛咖品质的影响比较

Table 5 Comparison of the effects of microwave treatment and hot water blanching on quality characteristics of maca

样品 处理条件	热水烫漂(沸水)					微波处理(14W/g、 60s、2:1(g/mL))		冰鲜玛咖 未处理
	30s	60s	90s	120s	150s	60s、2:1(g/mL)	未处理	
黑芥子酶相对酶活/%	56.83	27.65	15.17	7.91	2.26	1.07	100	
芥子油苷含量/%	1.29	1.23	1.07	0.93	0.75	1.13	1.36	
VC含量/(mg/kg)	46.9	38.8	33.2	29.7	26.6	37.6	51.3	
蛋白质含量/%	12.72	11.37	10.53	9.12	8.67	9.31	13.12	

微波处理与热水烫漂对玛咖品质均有一定的影响, 玛咖经处理后分别测定了黑芥子酶相对酶活、芥子油苷含量、VC含量和蛋白质含量, 结果详见表5。根据对速冻果蔬残余酶相对酶活的公认参考值要求^[25-27], 确定残余酶相对酶活低于5%为热水烫漂终点, 以获得良好的玛咖品质^[15]。从表5可知, 热水烫漂需要150s才能达到烫漂终点要求, 此时玛咖黑芥子酶相对酶活降低到2.26%, 但玛咖中重要次生代谢产物芥子油苷含量也降低到0.75%, 同时VC和蛋白质含量也有不同程度的下降, 营养成分损失较多。而在最佳工艺条件下经微波钝化, 玛咖中剩余黑芥子酶相对酶活仅为1.07%, 芥子油苷含量为1.13%, VC含量为37.6mg/kg, 蛋白质含量为9.31%, 均高于传统热水烫漂法。因此, 微波处理

不仅能快速、充分地钝化黑芥子酶, 而且能较好地保留玛咖中原有的营养成分。

3 结论

3.1 微波强度、处理时间和料液比对微波钝酶效果均有不同程度的影响, 其中微波强度和微波时间对黑芥子酶相对酶活有非常明显的交互作用, 即玛咖黑芥子酶相对酶活在高微波强度, 长时间处理条件下降低显著。各因素中, 以微波强度影响最大, 其次是微波时间和料液比。通过响应面分析法优化, 建立了微波处理对玛咖黑芥子酶相对酶活影响的数学回归模型方程, 该模型拟合度良好, 能较好地预测玛咖微波处理后黑芥子酶相对酶活与微波强度、处理时间和料液比之间的关系。

3.2 与传统热水烫漂相比, 微波处理时间较短, 能较大限度地保留了玛咖中营养成分及外观品质。通过响应面法优化选择的较佳工艺条件为: 在料液比2:1(g/mL)、微波强度14W/g时, 对冰鲜玛咖处理60s。此时玛咖中剩余黑芥子酶相对酶活仅为1.07%, 芥子油苷含量为1.13%, 较热水烫漂损失率下降了28%, VC含量为37.6mg/kg, 较热水烫漂损失率下降了21%, 蛋白质含量无显著变化。同时微波热穿透力强、加热快、能耗小等特点在本研究中也得到了充分体现。

参考文献:

- [1] 甘瑾, 冯颖, 何钊, 等. 云南栽培3种颜色玛咖中总生物碱含量分析[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 415-419.
- [2] WANG Yali, WANG Yuchun, BRIAN M, et al. Maca: An Andean crop with multi-pharmacological functions[J]. Food Research International, 2007, 40(7): 783-792.
- [3] GONZALES G, VALERIO L G. Medicinal plants from Peru: a review of plants as potential agents against cancer[J]. Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry, 2006, 6(5): 429-444.
- [4] MUHAMMAD I, ZHAO J P, DUNBAR D C, et al. Constituents of *Lepidium meyenii* "maca"[J]. Phytochemistry, 2002, 59(1): 105-110.
- [5] 袁高峰, 陈思学, 汪俏梅. 芥子油苷及其代谢产物的生物学效应研究与应用[J]. 核农学报, 2009, 23(4): 664-668.
- [6] 阮颖, 周朴华, 刘春林. 植物硫代葡萄糖苷-黑芥子酶底物系统[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2007, 33(1): 18-23.
- [7] 金文闻, 王晴芳, 李硕, 等. 新疆产玛咖挥发油成分研究[J]. 食品科学, 2009, 30(12): 39-43.
- [8] FAHEY J W, ZALCMANN A T, TALALAY P. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates plants[J]. Phytochemistry, 2001, 56(1): 5-51.
- [9] 杨静. 营养状态和采收处理对小白菜葡萄糖硫苷的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [10] MATSUIA K N, GRANADOB L M, OLIVEIRAC P V, et al. Peroxidase and polyphenol oxidase thermal inactivation by microwaves in green coconut water simulated solutions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(5): 852-859.
- [11] 黄俊丽, 张慜. 双孢白蘑菇干燥前微波与高温瞬时蒸汽联合烫漂预处理对酶活和品质影响的研究[J]. 干燥技术与设备, 2010, 4(8): 150-157.

- [12] VERKERK R, DEKKER M. Glucosinolates and myrosinase activity in red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* f. *rubra* DC) after various microwave treatments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(24): 7318-7323.
- [13] 唐小俊, 池建伟, 张名位, 等. 苦菜的微波灭酶技术[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(4): 200-203.
- [14] 张玉荣, 周显青, 果玉茹. 小麦胚微波灭酶工艺参数研究[J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(2): 7-10.
- [15] 许韩山, 张愨, 孙国才. 速冻毛豆漂烫工艺[J]. *食品生物技术学报*, 2010, 29(5): 653-659.
- [16] 刘月萍. 黑芥子酶提取、性质及固定化研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2007.
- [17] 方强, 王海宏, 乔勇进, 等. 不同来源黑芥子酶提纯的比较研究[J]. *保鲜与加工*, 2008, 47(4): 34-37.
- [18] 陈钧辉, 李俊, 张东梅, 等. 生物化学实验[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 179-181.
- [19] JAMES R B, GRAHAM K M, ANNIE N, et al. Quantitative analysis of flavour precursors and pyruvate levels in different tissues and cultivars of onion (*Allium cepa*)[J]. *Food Chemistry*, 1999, 64(2): 257-261.
- [20] 金闻文. 药食两用植物玛咖(*Lepidium meyenii*)的功效物质研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [21] 大连轻工业学院, 华南理工大学, 郑州轻工业学院, 等. 食品分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2004: 286-289.
- [22] 王绍林. 微波钝化酶的机理及其设备开发[J]. *农业工程学报*, 2009, 12(3): 167-171.
- [23] 卓成龙, 宋江峰, 李大婧, 等. 微波处理对毛豆仁 POD 酶活的影响[J]. *食品科学*, 2010, 31(14): 289-293.
- [24] 黄俊丽, 张愨. 高温蒸汽瞬时烫漂对黑牛肝菌酶活及品质影响的研究[J]. *食品生物技术学报*, 2010, 29(5): 653-659.
- [25] 林志民. 速冻蔬菜热烫处理的研究[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 1998, 26(5): 110-113.
- [26] 张立彦, 闵汉明, 刘锋. 香蕉中多酚氧化酶的灭酶条件研究[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(2): 105-107.
- [27] MUKHERJEE S, CHATTOPADHYAY P K. Whirling bed blanching of potato cubes and its effects on product quality[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(1): 52-60.