

菜籽蛋白的弱酸高盐法提取工艺优化及品质分析

方雪莲^{1,2}, 冯子盛¹, 何静仁^{1,3,4}, 杨尚华⁵, 张 瑞^{1,3,4}

(1. 武汉轻工大学 硒科学与工程现代产业学院, 武汉 430023; 2. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023; 3. 湖北省农产品加工与转化重点实验室, 武汉 430023; 4. 国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 湖北省绿色富硒农产品精深加工工程技术研究中心, 武汉 430023; 5. 湖北楚福油脂股份有限公司, 湖北 仙桃 433005)

摘要:旨在揭示弱酸高盐法提取菜籽蛋白的潜力,以脱脂低温压榨菜籽饼为原料,MgCl₂溶液为提取液,采用弱酸高盐法提取菜籽蛋白,采用单因素实验研究提取温度、提取pH、提取时间、提取液浓度及料液比对菜籽蛋白提取率的影响,采用正交实验进行菜籽蛋白的弱酸高盐法提取工艺优化,并比较弱酸高盐法菜籽蛋白与碱提酸沉法菜籽蛋白在抗营养因子(植酸、硫苷和单宁)含量与感官特性(气味、色泽)上的差异。结果表明:弱酸高盐法提取菜籽蛋白的最佳工艺条件为提取温度50℃、提取pH 6.5、提取时间150 min、提取液浓度150 mmol/L、料液比1:30,在最佳工艺条件下菜籽蛋白提取率为(48.00±1.12)%,纯度为(73.99±2.87)%;弱酸高盐法菜籽蛋白的单宁含量为(0.90±0.06)%,植酸含量为(0.04±0.01)%,未检测出硫苷,色泽为浅黄色,各指标明显优于碱提酸沉法菜籽蛋白。弱酸高盐法作为一种温和的工艺在菜籽蛋白提取方面具有较好的开发潜力和应用前景。

关键词:菜籽蛋白;弱酸高盐提取;感官特性;抗营养因子

中图分类号:TS229;TQ932

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2024)05-0054-06

Optimization of extraction process and quality analysis of rapeseed protein with weak acid and high salt method

FANG Xuelian^{1,2}, FENG Zisheng¹, HE Jingren^{1,3,4},
YANG Shanghua⁵, ZHANG Rui^{1,3,4}

(1. School of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 3. Hubei Key Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan 430023, China; 4. Hubei Engineering Research Center for Deep Processing of Green Se-rich Agricultural Products, National R&D Center for Se-rich Agricultural Products Processing, Wuhan 430023, China; 5. Hubei Chufu Oil Co., Ltd., Xiantao 433005, Hubei, China)

Abstract: To reveal the potential of extracting rapeseed protein by weak acid and high salt method, with defatted low-temperature pressed rapeseed cake as raw material, MgCl₂ solution as extractant, the protein was extracted by weak acid and high salt method. The effects of extraction temperature, extraction pH, extraction time, extractant concentration and material-liquid ratio on rapeseed protein extraction rate were

收稿日期:2023-03-02;修回日期:2024-01-11

基金项目:湖北省自然科学基金(2022CFB869);2023年湖北省揭榜制粮食科技项目(2023HBLSKJ008)

作者简介:方雪莲(1996),女,在读硕士,研究方向为功能性食品营养与功效评价(E-mail)kana20201996@163.com。

通信作者:何静仁,教授,博士(E-mail)jingren.he@whpu.edu.cn;张 瑞,副教授,博士(E-mail)ruizhangwhpu@126.com。

studied by single factor experiment, and then orthogonal experiment was conducted to optimize the extraction conditions. The differences of anti-nutritional factors (phytic acid, glucosinolate and tannin) content and sensory characteristics (smell and color) between rapeseed protein extracted by weak acid and high salt method and alkali extraction and acid precipitation method were

further studied. The results showed that the optimal conditions for extracting rapeseed protein with weak acid and high salt method were as follows: extraction temperature 50 °C, extraction pH 6.5, extraction time 150 min, MgCl₂ solution concentration 150 mmol/L, and material – liquid ratio 1:30. Under the optimal conditions, the extraction rate of rapeseed protein was (48.00 ± 1.12)%, and the purity was (73.99 ± 2.87)%. The tannin and phytic acid contents of rapeseed protein obtained by this method were (0.90 ± 0.06)% and (0.04 ± 0.01)%, respectively, no glucosinolate was detected, and the color was light yellow. Each index was obviously better than that of rapeseed protein prepared by alkali extraction and acid precipitation method. Weak acid and high salt method, as a mild process, has good development potential and application prospect in rapeseed protein extraction.

Key words: rapeseed protein; weak acid and high salt extraction; sensory property; anti – nutritional factor

油菜,学名芸薹,十字花科植物,是世界四大油料作物之一,是我国第一大油料作物^[1-2]。菜籽饼粕是油菜籽榨油后的副产物,含 35% ~ 45% 的蛋白质,主要由储藏蛋白和膜蛋白组成,其中储藏蛋白由 12S 球蛋白和 2S 清蛋白组成^[3],其氨基酸组成平衡且具有较高含量的含硫氨基酸,接近联合国粮农组织/世界卫生组织/联合国大学 (FAO/WHO/UNU) 的参考蛋白模式^[4],因此菜籽饼粕被视为一种优质蛋白质的来源。

目前广泛使用碱提酸沉法制备菜籽蛋白,但该方法产品色泽深、抗营养因子(硫苷、植酸和多酚类化合物)含量高、部分功能性性质较差^[5],无法满足加工以及消费者要求,因此需要寻找新的提取方法。陈卓^[6]采用 CaCl₂ 溶液 (pH 3 ~ 8) 作提取液对大豆蛋白的酸性可溶蛋白组分进行提取,结果发现,当 Ca²⁺ 浓度在 0.4 ~ 0.5 mol/L 时,大豆蛋白的提取率和回收率接近峰值。由于菜籽蛋白与大豆蛋白具有相似的结构(球蛋白均为六聚体),高浓度的二价金属盐离子可能也适用于菜籽蛋白的提取。胡志和等^[7]研究发现,菜籽蛋白在 0.8 mol/L 的 MgCl₂ 溶液 (pH 3.8 ~ 8.0) 中的溶解度显著优于相同浓度的 CaCl₂ 溶液和 NaCl 溶液。除此之外,植酸作为强金属螯合剂,与 Mg²⁺ 可以通过离子键形成络合物^[8],降低菜籽蛋白中的植酸含量,而将提取过程控制在弱酸性环境下,也可有效避免碱性 pH 引起的多酚氧化^[9]。综上,弱酸性盐溶液理论上有利于菜籽蛋白的提取,但前人研究多关注于提取效率,而少有涉及菜籽蛋白的品质评价。

本研究在前人的研究基础上,以脱脂低温压榨菜籽饼为原料,探究弱酸 (pH 5.0 ~ 7.0) 高浓度盐溶液 (50 ~ 250 mmol/L MgCl₂) 对菜籽蛋白提取的影响,并采用单因素实验和正交实验优化提取工艺,同

时,比较该法制备的菜籽蛋白与传统的碱提酸沉法制备的菜籽蛋白的感官特性(气味、色泽)和抗营养因子含量差异,以期弱酸高盐法菜籽蛋白的应用提供理论依据与科学基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

低温压榨菜籽饼,购自湖北仙桃。正己烷、氯化镁、盐酸、氢氧化钠、碳酸钠,国药集团化学试剂有限公司;单宁、植酸,阿拉丁试剂有限公司;黑芥子硫苷酸钾,麦克林生化科技有限公司;BSA 试剂盒,碧云天生物科技。

AL 204 分析天平,梅特勒 – 托利多仪器有限公司;DF – 101S 集热式恒温加热磁力搅拌器;TGL205 离心机;FD5 – 3 冷冻干燥机;EnSpire 酶标仪,珀金埃尔默仪器有限公司;V1200 可见分光光度计;JK 9870 凯氏定氮仪;ST2100 pH 计;电子鼻 C – Nose;UltraScan VIS 色差仪,HunterLab 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菜籽蛋白的提取

对低温压榨菜籽饼采用乙醚浸泡脱脂后进行蛋白提取。

弱酸高盐法:取 5 g 脱脂低温压榨菜籽饼,按照一定料液比加入一定浓度的 MgCl₂ 提取液,用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调节 pH 至一定值,一定水浴温度下搅拌提取一定时间,离心 (4 °C, 4 000 r/min, 15 min) 后取上清液,再用 1 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 为 4.0,静置 1 h,离心收集沉淀,将沉淀真空冻干后得到菜籽蛋白 (RP1)。

碱提酸沉法:取 5 g 脱脂低温压榨菜籽饼按料液比 1:30 加入去离子水,用 1 mol/L 的 NaOH 溶液调 pH 到 11.0,50 °C 水浴搅拌提取 90 min,离心 (4 °C, 4 000 r/min, 15 min) 后取上清液,用 1 mol/L 的 HCl 溶液将 pH 调为 4.0,静置 1 h,离心收集沉

淀,冷冻干燥后得到菜籽蛋白(RP2)。

1.2.2 蛋白质含量及菜籽蛋白提取率的测定

参考 GB 5009.5—2016 中凯氏定氮法(蛋白质换算系数 $N = 6.25$)测定蛋白质的含量,按照公式(1)计算菜籽蛋白提取率(Y)。

$$Y = A_2/A_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_1 为原料中蛋白质的质量,g; A_2 为提取上清液中蛋白质的质量,g。

1.2.3 感官特性的测定

气味:采用电子鼻测定。分别称取 5 g RP1、RP2 于 20 mL 顶空瓶内,50 °C 水浴加热 30 min,进样针插入顶空瓶,电子鼻进行测定,测定条件为进样时间 120 s,检测时间 30 s,清洗时间 120 s,气体流速 1 L/min,电子鼻传感器类型见表 1。

表 1 电子鼻传感器类型

传感器	响应物质	传感器	响应物质
S1	短链烷烃	S15	对含氮类物质敏感
S2	含碳物质等	S16	对硫化物敏感
S3	氢气	S17	含氢物质
S4	硫化物	S18	酒精,部分有机溶剂等
S5	含氮类物质	S19	对醇类、醛类、酮类、苯类敏感
S6	醛酮类	S20	对短链烷烃类敏感
S7	短链烷烃类可燃性气体	S21	可燃性气体等
S8	液化气	S22	挥发性有机化合物
S9	烷烃类、醇类、酮类等	S23	对烷烃、烯烃、芳烃等敏感
S10	氢气、含氢物质	S24	对烷烃、烯烃、氢气等敏感
S11	烷烃、一氧化碳等	S25	对烷烃类、一氧化碳、烯醛类、醇类、氮氧化物、酮类、醛类等敏感
S12	部分有机溶剂	S26	对部分有机溶剂敏感
S13	短链烷烃类	S27	硫化物、氮化物、碳化物、碳氢化合物以及氮氧化物等
S14	短链烷烃	S28	对短链烷烃敏感

色泽:采用色差仪进行测定。用黑白板对仪器进行校正,设置反射模式为镜面反射,取适量样品加入比色皿,记录样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

1.2.4 抗营养因子含量的测定

参照 GB/T 27985—2011 的 Folin - Denis 比色法测定单宁含量;参考时侠清等^[10]的方法,采用硫酸铁铵 - 双吡啶比色法测定植酸含量。

硫苷含量的测定参考王宁惠^[11]的方法,并稍作修改。取 100 mg 样品加入 10 mL 具塞试管中,沸水

浴中干蒸 10 min,向样品中加入 10 mL 90 °C 热水,再在沸水浴中蒸煮 30 min,中间搅动两次,冷却后加水稀释至 10 mL,摇匀,离心取上清液,向上清液中加入 2 mL 0.1% 羧甲基纤维素钠溶液,再加入 1 mL 氯化钼显色溶液,摇匀后于 24 °C 水浴锅中放置 3 h,在 540 nm 处测定吸光度,以含有 0.1% 羧甲基纤维素钠的氯化钼溶液作参比溶液,代入以黑芥子硫苷酸钾绘制的标准曲线方程中计算硫苷含量。

1.2.5 数据处理

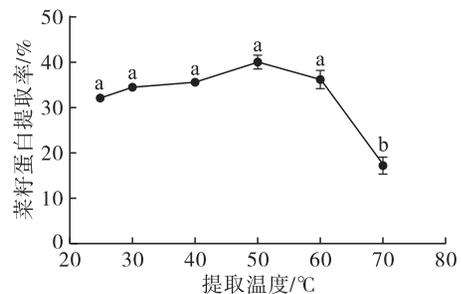
采用 Excel 2019 统计分析和 GraphPad Prism 9.0 软件进行数据处理、分析、作图,所有实验数据平行测定 3 次。

2 结果与分析

2.1 弱酸高盐法菜籽蛋白提取单因素实验

2.1.1 提取温度对菜籽蛋白提取率的影响

在料液比 1:20、提取液浓度 200 mmol/L、提取 pH 6.0、提取时间 90 min 的条件下,考察提取温度对菜籽蛋白提取率的影响,结果如图 1 所示。



注:不同字母表示存在显著差异($p < 0.05$)。下同

图 1 提取温度对菜籽蛋白提取率的影响

由图 1 可知,菜籽蛋白提取率随着提取温度的升高呈现先上升后下降的趋势。在 25 ~ 50 °C 时,随着提取温度的上升,菜籽蛋白提取率升高,在 50 °C 达到最大,为 $(39.71 \pm 0.78)\%$ 。然而,当提取温度超过 50 °C 后,菜籽蛋白提取率明显下降,当提取温度升到 70 °C 时,菜籽蛋白提取率急速降低到 $(17.14 \pm 1.02)\%$,仅约为 25 °C 时的 1/2。这是由于在一定温度范围内,温度的升高可以降低体系黏度从而加快分子运动,增加蛋白质的溶解度,而温度过高导致菜籽蛋白变性,如 12S 清蛋白的变性温度为 60 °C,蛋白质变性后,其高级结构被破坏,溶解度降低,导致提取液中的蛋白质含量下降^[12]。因此,选择提取温度为 50 °C。

2.1.2 提取 pH 对菜籽蛋白提取率的影响

在料液比 1:20、提取液浓度 200 mmol/L、提取温度 50 °C、提取时间 90 min 的条件下,考察提取 pH 对菜籽蛋白提取率的影响,结果如图 2 所示。

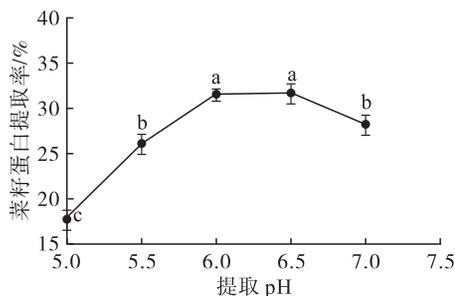


图2 提取 pH 对菜籽蛋白提取率的影响

由图2可知,随着提取 pH 从 5.0 升高至 6.0,菜籽蛋白提取率显著升高($p < 0.05$),在 pH 6.0 时菜籽蛋白提取率达到 $(31.57 \pm 0.54)\%$,在 pH 升至 6.5 时菜籽蛋白提取率略有上升,为 $(31.68 \pm 1.08)\%$,但与 pH 6.0 的无显著差异($p > 0.05$)。当 pH 继续升高至 7.0 时,菜籽蛋白提取率下降至 $(28.10 \pm 1.01)\%$ 。菜籽 12S 球蛋白的等电点在 pH 7.0 附近^[3],在等电点时,蛋白质由于强烈的分子间相互作用而聚集沉淀,从而降低蛋白质的溶解度^[13]。另外,实验发现,随着 pH 的逐渐升高,提取液颜色由浅棕色转为深褐色,这可能是由于多酚类化合物通过共价作用与蛋白质结合形成了更多的复合物^[5]。综合考虑,选择 pH 6.0 为最佳 pH。

2.1.3 提取时间对菜籽蛋白提取率的影响

在料液比 1:20、提取液浓度 200 mmol/L、提取 pH 6.0、提取温度 50℃ 的条件下,考察提取时间对菜籽蛋白提取率的影响,结果如图 3 所示。

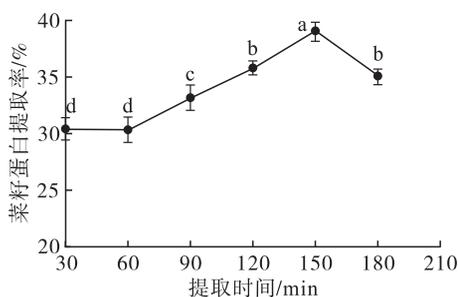


图3 提取时间对菜籽蛋白提取率的影响

由图3可知,随着提取时间的延长,菜籽蛋白提取率呈现先上升后下降的趋势。在 30~150 min 时,菜籽蛋白提取率由 $(30.38 \pm 1.05)\%$ 上升至 $(39.08 \pm 0.84)\%$,随提取时间的延长,可溶性蛋白溶解增加,当提取时间达到 150 min 时,可溶性蛋白已经基本完全溶解,达到传质平衡^[14]。继续延长提取时间至 180 min 后,提取率下降至 $(35.06 \pm 0.67)\%$,说明继续延长提取时间对菜籽蛋白提取率并没有促进作用。综合考虑,选择提取时间 150 min 较合适。

2.1.4 提取液浓度对菜籽蛋白提取率的影响

在料液比 1:20、提取 pH 6.0、提取时间 150

min、提取温度 50℃ 的条件下,考察提取液浓度对菜籽蛋白提取率的影响,结果如图 4 所示。

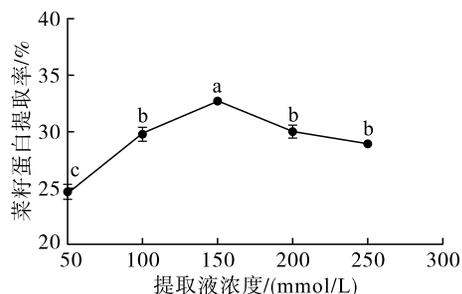


图4 提取液浓度对菜籽蛋白提取率的影响

由图4可知,菜籽蛋白提取率随着提取液浓度的增大呈先上升后下降的趋势,提取液浓度为 50~150 mmol/L 时,菜籽蛋白提取率由 $(24.75 \pm 0.60)\%$ 上升至 $(32.76 \pm 0.16)\%$ 。在盐浓度较低时,随盐浓度增大,蛋白质与水分子的相互作用加强,溶解度增加,表现为盐溶效应^[15],因此菜籽蛋白提取率逐渐上升,但当提取液浓度超过 150 mmol/L 时,盐离子破坏了菜籽蛋白水化层,蛋白质溶解度降低,表现为盐析效应^[16],菜籽蛋白提取率反而会下降。因此,选择提取液浓度为 150 mmol/L 较合理。

2.1.5 料液比对菜籽蛋白提取率的影响

在提取液浓度 150 mmol/L、提取 pH 6.0、提取时间 150 min、提取温度 50℃ 的条件下,考察料液比对菜籽蛋白提取率的影响,结果如图 5 所示。

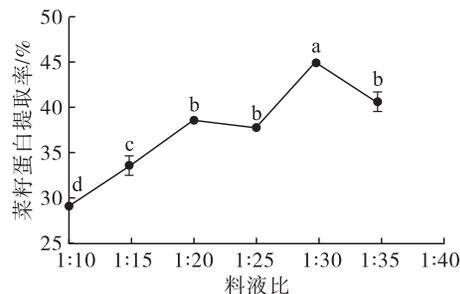


图5 料液比对菜籽蛋白提取率的影响

由图5可知,在料液比 1:10~1:25 时,菜籽蛋白提取率先上升后平缓,之后在料液比 1:30 时达到最大 $(44.92 \pm 0.15)\%$,料液比继续增加至 1:35 时,菜籽蛋白提取率下降。综合考虑,选择最佳料液比为 1:30。

2.2 弱酸高盐法菜籽蛋白提取的正交实验优化

在单因素实验的基础上选择提取温度(A)、提取 pH(B)、提取时间(C)、提取液浓度(D)和料液比(E)为考察因素,以菜籽蛋白提取率(Y)为考察指标,设计 $L_{16}(4^5)$ 正交实验,优化菜籽蛋白质提取工艺参数。正交实验因素与水平见表 2,正交实验设计及结果见表 3。

表2 正交实验因素与水平

水平	A 提取温度/℃	B 提取pH	C 提取时间/min	D 提取液浓度/(mmol/L)	E 料液比
1	30	5.5	60	100	1:20
2	40	6.0	90	150	1:25
3	50	6.5	120	200	1:30
4	60	7.0	150	250	1:35

表3 正交实验设计及结果

实验号	A	B	C	D	E	Y/%
1	1	1	1	1	1	31.81 ± 1.16
2	1	2	2	2	2	34.84 ± 1.97
3	1	3	3	3	3	36.11 ± 1.72
4	1	4	4	4	4	37.04 ± 0.59
5	2	1	2	3	4	37.45 ± 1.88
6	2	2	1	4	3	37.97 ± 1.08
7	2	3	4	1	2	39.77 ± 2.83
8	2	4	3	2	1	30.07 ± 2.74
9	3	1	3	4	2	36.71 ± 0.82
10	3	2	4	3	1	33.59 ± 0.51
11	3	3	1	2	4	42.77 ± 2.22
12	3	4	2	1	3	39.19 ± 2.64
13	4	1	4	2	3	37.42 ± 0.77
14	4	2	3	1	4	31.60 ± 1.26
15	4	3	2	4	1	30.60 ± 0.61
16	4	4	1	3	2	29.92 ± 1.46
k_1	34.95	35.85	35.62	35.59	31.52	
k_2	36.32	34.50	35.52	36.28	35.31	
k_3	38.06	37.31	33.62	34.27	37.67	
k_4	32.38	34.06	36.95	35.58	37.22	
R	5.68	3.25	3.33	2.01	6.15	

由表3可知,5个因素对菜籽蛋白提取率的影响大小为E>A>C>B>D,即料液比>提取温度>提取时间>提取pH>提取液浓度,最优方案为A₃B₃C₄D₂E₃,即提取温度50℃、提取pH6.5、提取时间150min、提取液浓度150mmol/L、料液比1:30。在最优方案下进行3次重复实验,菜籽蛋白提取率为(48.00 ± 1.12)%,纯度为(73.99 ± 2.87)%。

2.3 菜籽蛋白的感官特性

2.3.1 气味

两种菜籽蛋白的电子鼻测定结果如图6所示。

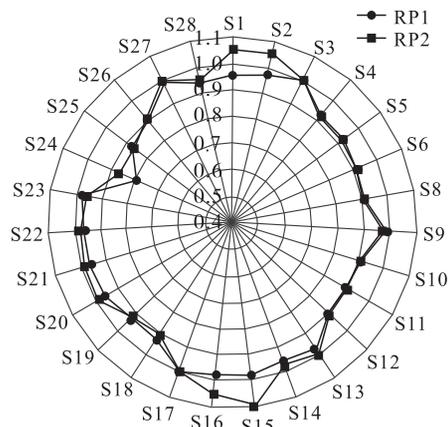


图6 两种菜籽蛋白的电子鼻雷达图

由图6可知,S1、S2、S15、S16、S24传感器对两种菜籽蛋白样品的气味响应值存在差异,其对RP1的响应值分别为0.95、0.98、0.98、0.98、0.79,对RP2的响应值分别为1.05、1.05、1.10、1.05、0.87,RP1的响应值整体低于RP2的。根据表1中传感器对应的响应物质可知,相比RP2,RP1含有较少的硫化物、烷烃类物质,气味更佳。

硫苷在不同环境下降解生成的物质不同,在偏中性(pH 5~8)条件下生成异硫氰酸酯,在碱性条件下生成噁唑烷、二硫化碳^[17]等,因此推断硫苷降解产物的不同可能导致了RP1和RP2气味的差异。综上所述,弱酸高盐法菜籽蛋白比碱提酸沉法菜籽蛋白具有更易于让人接受的气味。

2.3.2 色泽

两种菜籽蛋白的色泽测定结果见表4和图7。

表4 两种菜籽蛋白色差值

样品	L* 值	a* 值	b* 值
RP1	88.6 ± 0.2 ^a	-2.0 ± 0.0 ^b	13.2 ± 0.3 ^a
RP2	43.7 ± 0.8 ^b	3.4 ± 0.1 ^a	6.7 ± 0.6 ^b

注:同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同

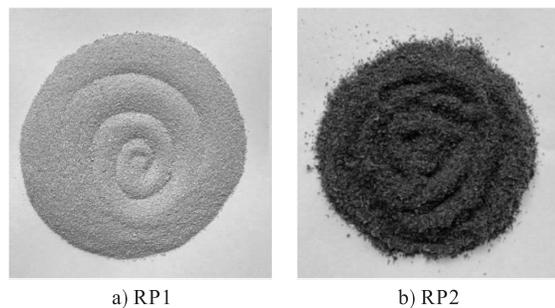


图7 两种菜籽蛋白粉末颜色对比

由表4可知,RP1的L*、a*、b*值分别为88.6 ± 0.2、-2.0 ± 0.0和13.2 ± 0.3,RP2的L*、a*、b*值分别为43.7 ± 0.8、3.4 ± 0.1和6.7 ± 0.6,两种菜籽蛋白的L*、a*、b*值差异显著($p < 0.05$)。结合图7观察,RP1为浅黄色,RP2为棕褐色,这种强染色主要是由于酚类化合物氧化产物的存在所导致的,一般来说,酚类化合物可以通过共价相互作用与菜籽蛋白形成深色复合物^[18]。综上,弱酸高盐法菜籽蛋白色泽较碱提酸沉法的浅。

2.4 菜籽蛋白的抗营养因子含量

两种菜籽蛋白的抗营养因子含量见表5。

表5 两种菜籽蛋白的抗营养因子含量

样品	单宁/%	植酸/%	硫苷/(μmol/g)
RP1	0.90 ± 0.06 ^a	0.04 ± 0.01 ^b	ND
RP2	0.71 ± 0.01 ^b	0.42 ± 0.02 ^a	21.71 ± 0.22

注:ND表示未检出

由表5可知,RP1的单宁含量显著高于RP2的($p < 0.05$),说明提取方式对单宁含量有明显的影 响。RP1的植酸含量显著低于RP2的($p < 0.05$),这是因为弱酸高盐法提取过程中,植酸与 Mg^{2+} 螯合生成沉淀^[8]后可以通过离心除去,而在碱性溶液中无沉淀产生,因此RP2中植酸含量更高。RP2中硫 苷含量为 $(21.71 \pm 0.22) \mu\text{mol/g}$,而RP1中未检测到硫 苷,表明相比弱酸环境提取,碱性溶液提取不利于 去除菜籽蛋白中的硫苷,Zhang等^[19]研究发现在 pH 8~12范围内,硫苷含量与pH成正比。综合来 看,采用弱酸高盐法提取对降低菜籽蛋白中抗营养 因子含量是有积极作用的,这对于菜籽蛋白在食品 中的开发利用非常重要。

3 结 论

本实验确定了弱酸高盐法提取菜籽蛋白的最佳 工艺条件为提取温度 50°C 、提取pH 6.5、提取时间 150 min、提取液 $MgCl_2$ 浓度 150 mmol/L 、料液比 1:30,在最佳条件下菜籽蛋白提取率为 $(48.00 \pm 1.12)\%$,纯度为 $(73.99 \pm 2.87)\%$ 。最佳条件下制 备的菜籽蛋白的单宁含量为 $(0.90 \pm 0.06)\%$,植酸 含量为 $(0.04 \pm 0.01)\%$,未检测出硫苷。与传统的 碱提酸沉法制备的菜籽蛋白相比,弱酸高盐法提取 的菜籽蛋白具有植酸低、色泽浅和气味佳等特性。 本研究结果可为菜籽蛋白高值化利用及其资源开发 提供科学基础与理论支撑。今后还可以结合超滤法 分离菜籽蛋白,降低盐分,进一步促进食用化菜籽蛋 白产品的开发。

参考文献:

[1] 王汉中,殷艳.我国油料产业形势分析与发展对策建议 [J].中国油料作物学报,2014,36(3):414-421.
[2] 何微,李俊,王晓梅,等.全球油菜产业现状与我国油菜 产业问题、对策[J].中国油脂,2022,47(2):1-7.
[3] 王晓凡,熊光权,汪兰,等.菜籽蛋白提取及应用研究进 展[J].粮食与油脂,2010(12):5-9.
[4] WANASUNDARA J P D, TAN S, ALASHI A M, et al. Proteins from canola/rapeseed: Current status [M]// NADATHUR S R, WANASUNDARA J P D, SCANLIN L. Sustainable protein sources. London: Elsevier, 2017: 285-304.
[5] 郑畅,杨涓,张苗,等.菜籽多酚研究进展[J].中国油料 作物报,2017,39(2):269-280.

[6] 陈卓.超滤-渗滤技术制备饮料专用大豆蛋白的研究 [D].广州:华南理工大学,2014.
[7] 胡志和,安涛,刘剑虹,等.金属离子及pH值对菜籽蛋 白溶解性及持水性的影响[J].食品科学,2000,21(2): 12-15.
[8] 冯屏,冯小兵,徐玉佩.植酸与金属离子络合的研究[J]. 中国油脂,2006,31(8):63-66.
[9] 阚茗铭,叶发银,赵国华.多酚-蛋白质共价作用及其对 食品体系的影响研究进展[J].食品科学,2015,36(1): 245-249.
[10] 时侠清,沙超,姚维东,等.双吡啶分光光度法测定小麦 植酸含量研究[J].安徽科技学院学报,2009,23(6): 10-14.
[11] 王宁惠.油菜籽(饼粕)中硫代葡萄糖甙总量速测方 法:氯化钡法[J].青海农林科技,2009(3):58-59.
[12] 杨万富.电解水提取冷榨菜籽蛋白工艺及其改性研究 [D].重庆:西南大学,2022.
[13] 袁麒,王旭苹,杨怀谷,等.不同pH条件下乳清蛋白- 桑椹多酚复合营养粉的制备及其理化性质[J].现代 食品科技,2023,39(5):164-174.
[14] 邹强.菜籽蛋白提取纯化及其功能特性的研究[D].长 沙:湖南农业大学,2011.
[15] 李强.牡丹籽盐溶蛋白提取分离、结构表征及乳化性 质研究[D].成都:四川农业大学,2018.
[16] JIN M H, XIE Y, XIE P L, et al. Physicochemical and functional properties of *Pleurotus geesteranus* proteins [J/OL]. Food Res Int, 2022, 162(PA): 111978 [2023-03-02]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111978>.
[17] 杨瑛洁,李淑燕,胡国伟,等.硫代葡萄糖苷的降解途径 及其产物的研究进展[J].西北植物学报,2011,31 (7):1490-1496.
[18] ROASA J, VILLA R D, MINE Y, et al. Phenolics of cereal, pulse and oilseed processing by-products and potential effects of solid-state fermentation on their bioaccessibility, bioavailability and health benefits: A review[J]. Trends Food Sci Tech, 2021, 116: 954-974.
[19] ZHANG Z Y, HE S T, LIU H Y, et al. Effect of pH regulation on the components and functional properties of proteins isolated from cold-pressed rapeseed meal through alkaline extraction and acid precipitation[J/OL]. Food Chem, 2020, 327: 126998 [2024-01-11]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126998>.