

菜籽蛋白的制备工艺、营养功效及其 应用研究进展

李哲斌*

(商丘职业技术学院食品工程学院, 商丘 476100)

摘 要: 菜籽蛋白是从菜籽油加工副产物菜籽饼粕中分离出来的一种具有较高利用价值的成分, 具有多种必需氨基酸、潜在的功能特性和优于其他大多数植物蛋白的营养价值, 是一种能够被人类食用的动物蛋白替代品。本文概述了菜籽蛋白生产和分离技术, 包括菜籽蛋白的提取、沉淀、超滤和浓缩, 重点介绍了菜籽蛋白的营养功效, 如血管紧张素转换酶抑制活性、抗血栓活性、抗氧化活性和降胆固醇活性, 并涉及菜籽蛋白在肉类类似物、食品包装、胶凝剂和乳化剂中的开发应用现状, 对于菜籽蛋白的深入研究开发与综合利用具有一定的参考价值。

关键词: 菜籽蛋白; 制备工艺; 营养功效; 开发应用

Research progress on preparation technology, nutritional benefit and application of rapeseed proteins

LI Zhe-Bin *

(College of Food Engineering, Shangqiu Polytechnic, Shangqiu 476100, China)

ABSTRACT: Rapeseed proteins are isolated from rapeseed meal which are byproducts of rapeseed oil processing and have high utilization value, and have multiple amino acids, potential functional properties and superior nutritional values than most other vegetable proteins, they are substitutes for other animal proteins that can be consumed by human. This paper reviewed the preparation and separation techniques of rapeseed proteins, including extraction, precipitation, ultrafiltration and concentration, emphatically introduced the nutritional effects of rapeseed proteins, such as angiotensin converting enzyme inhibitory activity, antithrombotic activity, antioxidant activity and cholesterol lowering activity, and involved the development and application status of rapeseed protein in meat analogues, food packaging, gelling agents and emulsifier, which has certain reference value for further research and comprehensive utilization of rapeseed protein.

KEY WORDS: rapeseed protein; preparation technology; nutritional benefit; development and application

0 引 言

油菜(*Brassica napus* L.)是我国重要的油料作物, 据统

计 2020 年我国油菜籽年产量已超过 1400 万 t, 占世界油菜籽总年产量的 25%, 位居世界第一^[1]。作为菜籽油生产加工的原料, 油菜籽含有 40%的油脂和 17%~26%的蛋白质^[2]。

基金项目: 河南省农业领域科技攻关项目(172102110252)

Fund: Supported by the Henan Provincial Science and Technology Research Project in the Field of Agriculture (172102110252)

*通信作者: 李哲斌, 硕士, 主要研究方向为食品加工技术与开发。E-mail: lizhebin7643@163.com

*Corresponding author: LI Zhe-Bin, Master, College of Food Engineering, Shangqiu Polytechnic, Shangqiu 476100, China. E-mail: lizhebin7643@163.com

菜籽饼粕是由油菜籽经压榨之后产生的大宗食品加工副产物,其年产量高达1000万^[3],它是一种优质的植物蛋白资源,其中的蛋白质含量达到320~400 g/kg^[4]。由于菜籽粕价格仅为豆粕的60%左右,目前市场上绝大部分的菜籽粕都应用于动物饲料中,以达到缓解豆粕资源紧缺和降低养殖成本的目的^[5]。

菜籽蛋白是从菜籽饼粕中通过分离或浓缩的方法制备的氨基酸组成均衡、营养效价高的可溶性植物蛋白^[6]。它以位于菜籽胚中的贮藏蛋白为主,主要含有12S球蛋白(cruciferin, 300~310 kDa)和2S清蛋白(napin, 12.5~14.5 kDa)两种组分^[7],其次存在少量油体蛋白和脂质转移蛋白^[8]。表1^[9-10]数据显示,菜籽蛋白中含有大量组成均衡的必需氨基酸(含量大于400 mg/g),与大豆蛋白相比,菜籽蛋白含有丰富的含硫氨基酸(如甲硫氨酸和半胱氨酸),更接近于联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)对人类健康要求所建立的参考蛋白质模式,营养价值明显优于其他植物蛋白(如大豆、豌豆和小麦等)^[11]。早在2010年,加拿大Burcon公司和荷兰DSM公司就生产出了菜籽蛋白产品,先后被美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration of the United Nations, FDA)和欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)认定为是安全的新型食品原料,推动了菜籽蛋白由动物饲料行业向食品加工领域的转向^[12]。然而,菜籽蛋白中存在的硫代葡萄糖苷、植酸和芥子酸等抗营养成分严重限制了其在食品工业中的应用与发展^[13]。经过几十年的研究,涌现出更加先进的菜籽蛋白的提取及纯化技术,使得这些抗营养成分大大削减而达到人类的营养需求。其次对菜籽蛋白功能及营养特性地深入研究,也为其

能够进军食品领域提供了一个有前途的解决方案。

因此,本文总结了近年来菜籽蛋白的制备工艺、营养功效及其在肉类类似物、包装材料和食品添加剂中的应用现状,为菜籽蛋白的进一步开发应用提供理论参考,以期全面助推以菜籽饼粕和菜籽蛋白为代表的油脂加工副产物的高值化利用与转化增值。

1 菜籽蛋白的制备工艺

1.1 提 取

经过压榨后的脱脂菜籽饼粕是用于制备菜籽蛋白的原料,通过初始的水提取步骤,获得大量提取液,再通过沉淀、超滤、蛋白质胶束聚集和浓缩等分离纯化步骤,可以获得不同比例和纯度的球蛋白和清蛋白,图1所示为菜籽蛋白制备流程。通常来说,菜籽蛋白的提取是在pH 11~12的碱性条件下进行的(如图1①所示),采用0.02 mol/L的NaOH溶液可使菜籽蛋白的提取率高达95%,而酸提取只能达到15%~20%的提取效果^[14]。

1.2 沉 淀

菜籽蛋白的分离纯化是通过调整提取液的pH、盐浓度和温度等因素,使其中特定的蛋白质组分达到最小溶解度并得以回收,以利于含有特定分子类型或组合物的蛋白质产品在某些领域能够得到充分利用^[15]。从碱溶之后得到的提取液中分离蛋白质需要经过沉淀或超滤过程(如图1②、③),由于不同的蛋白质组分具有不同的等电点,改变提取液的pH可导致特定的蛋白质组分发生沉淀^[16]。利用柠檬酸、盐酸等稀酸溶液将提取液pH调节至3.5~4.5,可使球蛋白发生沉淀析出^[17]。

表 1 标准蛋白、大豆蛋白、菜籽饼粕和蛋白产物中的必需氨基酸组成
Table 1 Essential amino acid compositions of standard proteins, soybean proteins, rapeseed meals and its protein products

氨基酸/(mg/g)	标准蛋白	大豆蛋白	菜籽饼粕	菜籽蛋白	球蛋白	清蛋白
半胱氨酸	-	8.0	23.9	39.0	81.0	14.0
异亮氨酸	30.1	19.7	43.3	51.8	60.0	61.0
亮氨酸	53.0	34.7	70.6	92.6	68.0	66.0
赖氨酸	45.0	23.7	55.6	56.2	34.0	46.0
甲硫氨酸	22.1	5.9	20.6	26.0	27.0	22.0
苯丙氨酸	38.1	22.5	38.3	51.3	43.0	40.0
苏氨酸	23.0	16.3	43.9	53.0	45.0	43.0
色氨酸	6.1	5.7	13.3	-	13.0	12.0
酪氨酸	-	13.5	32.2	39.3	34.0	25.0
缬氨酸	39.0	19.4	54.7	58.5	51.0	46.0
精氨酸	-	-	57.8	76.6	54.0	53.0

注: -代表在研究中未检测出。

1.3 超 滤

在超滤过程中,一种具有特定截留分子量的超滤膜会被用来去除小分子物质(如糖和无机盐),大分子蛋白质则保留在残留物中。一方面,碱溶提取物可以直接用超滤法进行过滤,得到混合蛋白质制剂;另一面,对酸化沉淀后的清液采用超滤法可以获得富含清蛋白的残留物^[17]。

经过超滤后得到的渗透液可通过冷水稀释改变其中的盐浓度,增强蛋白质分子间疏水相互作用以促进蛋白质的自发形成胶束而聚集析出(如图 1④所示)。该法是目前工业化生产菜籽蛋白的唯一方法,可以大批量制备纯度高且抗营养因子低的菜籽蛋白^[18]。利用这种方法获得的蛋白质产品包括胶束蛋白和未形成胶束蛋白的清液部分,前者蛋白质干物质含量为 90% (w:w),其中含有 7S 蛋白(60%~98%)、12S 蛋白(1%~15%)和 2S 蛋白(0~25%);后者含 12S (0~5%)、7S 蛋白(5%~40%)和 2S 蛋白(60%~95%)^[19]。总体来说,胶束聚集法在制备菜籽蛋白的损失较少,且能够实现脱毒,制备过程中不添加化学试剂,是一种具有前景的绿色制备工艺。

1.4 浓 缩

菜籽蛋白浓缩是通过有机溶剂(如乙醇)萃取脱脂的菜籽饼粕,去除菜籽次生代谢物(如硫代葡萄糖苷、植酸、单宁等)、可溶性非蛋白成分、残留油脂和色素等杂质而实现

的,能够制备得到蛋白质干物质含量为 60%~65%的蛋白产品(如图 1⑤所示)^[20]。刘玉兰等^[21]利用 70%乙醇作为萃取剂,在 50 °C条件下不断搅拌,利用醇洗技术制备菜籽浓缩蛋白,最终得到的浓缩蛋白产品色泽较浅,蛋白质含量为 61.02%,硫苷、植酸、单宁等杂质含量分别为 5.25 $\mu\text{mol/g}$ 、0.55%和 0.36%。虽然制备菜籽浓缩蛋白能够高效地“脱毒”,但在溶剂萃取的过程中,菜籽蛋白因变性而表现出有限的功能特性(如溶解度和乳状液稳定性降低等),导致菜籽浓缩蛋白的制备工艺依然处于实验室阶段,难以进行大规模工业化生产^[17]。

2 菜籽蛋白的营养功效

2.1 血管紧张素转换酶抑制活性

肾素-血管紧张素系统(renin angiotensin system, RAS)对于调节血压起着重要作用,肾素和血管紧张素-1-转换酶(angiotensin-1-convert enzyme, ACE)是控制 RAS 通路的主要调节因子^[22]。肾素将血管紧张素原转化为血管紧张素 I(angiotensin-I, AT-I),AT-I 又被 ACE 转化为血管紧张素 II(angiotensin-II, Ang-II),它是一种有效的血管收缩剂,可以诱导醛固酮的释放,从而提高钠浓度和血压^[23]。ACE 还能水解缓激肽(血管扩张剂),从而导致血管收缩后无法恢复原状。通过抑制 ACE 活性,减少 Ang-II 的形成和缓激肽的水解是降低血压的有效策略^[24]。MÄKINEN 等^[25]用 5 种

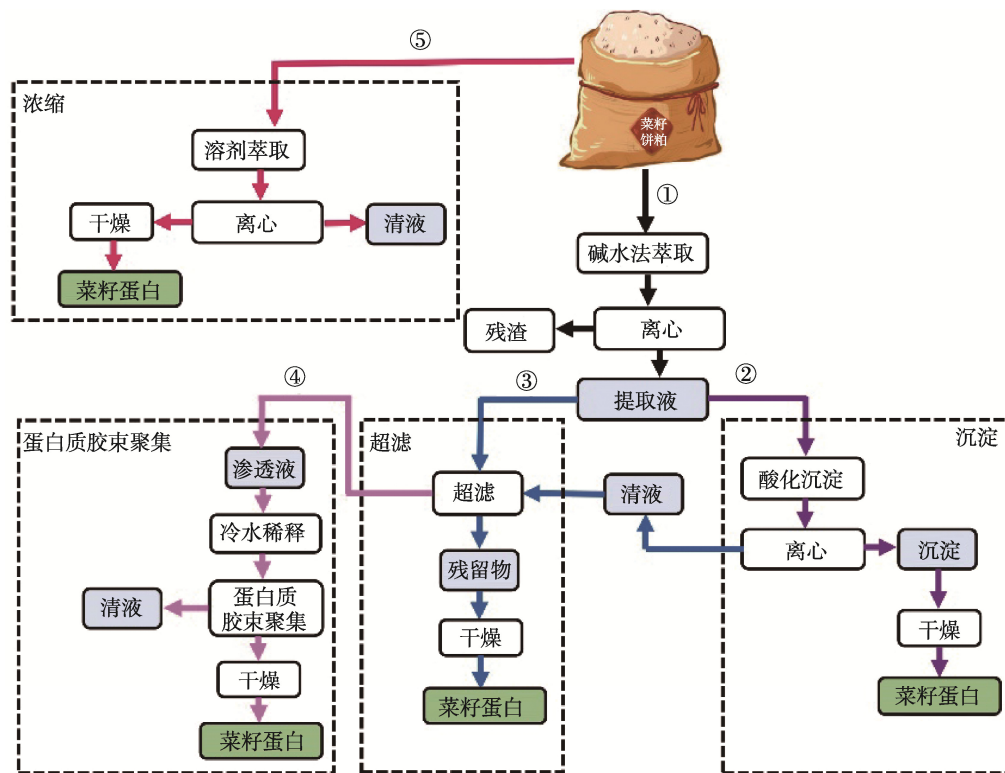


图 1 利用菜籽饼粕制备菜籽蛋白的工艺流程

Fig.1 Preparation of rapeseed proteins from rapeseed meal

蛋白酶水解菜籽蛋白并研究酶解物的 ACE 抑制能力时发现,所有酶解物均具有较高的 ACE 抑制活性(70%~90%),其中由碱性蛋白酶处理的酶解物的 ACE 抑制能力最强[抑制率为 89.4%,半抑制浓度(half inhibit concentration, IC_{50})为 0.02 mg/mL],类似的研究中报道了绿豆和豇豆蛋白水解物的 IC_{50} 值分别为 0.64 和 2.63 mg/mL^[26-27]。菜籽蛋白经酶解产生的多肽分子量较低(<5 kDa),且氨基酸序列中含有丰富的芳香族氨基酸和疏水性氨基酸,前者的羧基末端的环状结构更有利于与 ACE 活性部位的结合,后者促进了多肽与 ACE 之间的亲和,因此增强了菜籽蛋白及其酶解物对 ACE 抑制活性^[28]。

2.2 抑菌活性

微生物是引起食品发生腐败变质的主要原因,目前食品中广泛使用化学防腐剂(如山梨酸钾、苯甲酸钠和丙酸钙等)来抑制微生物的生长,延长食品货架期。然而使用天然、优质、高效的抑菌剂一直是人类的诉求,开发新型抑菌产品也越来越受到关注。研究表明菜籽蛋白对各种菌株都具有抑菌特性,且 IC_{50} 值在 20~200 g/L 之间不等,其中主要包括黄色镰孢菌(*Fusarium culmorum*)、尖孢镰刀菌(*Fusariumoxysporum* f. sp. *lycopersici*)、甘蓝黑斑菌(*Alternaria brassicicola*)、灰霉菌(*Botrytis Cinerea*)等^[29-30]。翟晓娜等^[18]利用碱溶酸沉工艺从菜籽饼粕中提取了菜籽蛋白,并研究它的抑菌活性,将 0.05 mL 质量浓度为 10 和 5 mg/mL 的菜籽蛋白溶液添加到金黄色葡萄球菌培养基中,发现平板上均产生了抑菌圈,直径大小分别为 15.23、11.02 mm,这说明菜籽蛋白表现出了较强的金黄色葡萄球菌抑制活性。而这种抑菌特性主要取决于菜籽蛋白组分中的清蛋白, NIOI 等^[29]从菜籽粕中提取并纯化清蛋白,并研究了它对高致病性朗氏芽孢杆菌(*Fusarium langsethiae*)的抑菌活性及其机制,发现纯化的清蛋白具有显著的抑菌能力,且 IC_{50} 值为 70 μ mol/L,其抑菌机制主要如下:1)清蛋白具有发挥抑菌能力的两种结构特征,其一是携带正电荷,与微生物细胞膜上的负电荷成分发生相互作用;其二是具有较高的精氨酸和赖氨酸含量,前者能够与两个脂质头部基团的磷酸部分形成强度较大的双齿氢键,提高了对微生物细胞膜的破坏能力,后者同样具有较高的生物相容性^[31];2)清蛋白结构中含有与钙调蛋白相似的两亲性的 α -螺旋,可能充当钙调蛋白拮抗剂影响细胞增殖过程^[29];3)清蛋白的抗真菌机制可能与其蛋白酶抑制能力有关,与真菌内部蛋白酶形成复合物,干扰真菌内部蛋白质代谢活动^[29]。

2.3 抗氧化活性

机体内积累的氧化自由基和脂质过氧化物会造成组织细胞的损伤,引起衰老、癌症、糖尿病等各项疾病^[32]。研究表明菜籽蛋白可以作为天然抗氧化剂,具有良好的抗氧化潜力,赵蓓等^[33]利用超声水提取菜籽清蛋白,测定产物的 1,1-

二苯基-2-三硝基苯肼自由基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl free radical, DPPH·)、羟自由基(hydroxyl free radical, OH·)和超氧阴离子自由基(superoxide anion free radical, $O_2^{\cdot-}$)清除能力,并与大豆分离蛋白和维生素 C 进行比较,用以反映菜籽清蛋白的体外抗氧化活性,结果发现菜籽清蛋白清除 DPPH·、OH·和 $O_2^{\cdot-}$ 的 IC_{50} 值为 0.112、0.143 和 18.03 mg/mL,维生素 C 清除 DPPH·、OH·和 $O_2^{\cdot-}$ 的 IC_{50} 值为 0.133、0.041 和 0.35 mg/mL,明显低于大豆分离蛋白 DPPH·、OH·和 $O_2^{\cdot-}$ 的 IC_{50} 值(7.3、11.05 和 6829 mg/mL)。这说明菜籽蛋白具有比普通植物蛋白(大豆分离蛋白)高的抗氧化活性,在未来或可将其添加到食品中,防止食品氧化变质,保护食品营养^[34]。氨基酸序列是决定菜籽蛋白能够发挥抗氧化活性的关键因素,由色氨酸(tryptophan, Trp)、异亮氨酸(isoleucine, Ile)、亮氨酸(leucine, Leu)和酪氨酸(tyrosine, Tyr)组成的三肽 Trp-Ile (Leu)-Tyr 序列中存在的疏水性氨基酸是提高抗氧化活性的结构基础,其次由 Tyr 或 Trp 构成的肽链羧基端在清除自由基方面也发挥着重要作用^[35-36]。

2.4 降胆固醇活性

以往的研究已经证明了膳食中摄入植物蛋白(如大豆蛋白、小麦蛋白等)可有效降低体内胆固醇水平,而这可能与植物蛋白中疏水氨基酸能够与胆汁酸结合有关^[37],利用菜籽蛋白的胆汁酸结合能力来评价其体外降胆固醇特性,菜籽蛋白酶解产物均能够与胆汁酸盐结合,且结合率为 5.81%~22.8%^[38]。通过体内研究也发现菜籽蛋白也能够通过调节机体脂质代谢状况来预防心血管疾病,刘玉兰等^[39]利用醇洗工艺制备醇洗菜籽浓缩蛋白,将其作为主要蛋白源配制饲料,饲喂大鼠 5 周后发现其血清中反映机体脂质水平的甘油三酯和低密度脂蛋白胆固醇水平符合参考范围且明显低于对照组,这表明摄入该菜籽浓缩蛋白能够调节机体脂质代谢,降低胆固醇水平,预防罹患动脉粥样硬化等多种心血管疾病的风险。

3 菜籽蛋白的开发应用情况

3.1 肉类类似物

由于人口和城市化推动需求增长,全球肉类生产和消费持续激增,早在 2012 年 FAO 就预测,截至 2050 年,全球肉类需求将达到 4.55 亿 t^[40]。而过度的动物肉制品消费不仅不利于人体健康,还会导致环境问题和动物福利的伦理关注。以植物为基础的肉类类似物受到了众多消费者的关注,并认为以豆类、油籽和谷物等来源的植物性肉类类似物在解决肉制品需求和未来食品供应的可持续性方面变得越来越重要^[41-42]。越来越多的研究将未被充分利用的富含蛋白质的食品加工副产物通过和其他成分混合,经过蛋白质重塑过程(如拉伸、捏合、修剪、压榨、折叠、挤压等)生产纤维肉类类似物^[43]。这是一种完全区别于利用细胞

培养产生肉类类似物的方法, JIA 等^[44]研究了菜籽蛋白作为制造肉类类似物蛋白质来源的潜力, 以乙醇水洗菜籽饼粕生产的菜籽蛋白浓缩物为原料, 利用剪切细胞技术加工制备纤维制品, 用纹理分析仪、共聚焦激光扫描显微镜和 X 射线显微断层扫描技术对所得产物进行了表征, 证明了菜籽粕蛋白具有作为一种能够替代大豆蛋白来源的可持续肉类模拟成分的商业应用的潜力。

3.2 食品包装

在诸多蛋白质资源中, 菜籽蛋白可能是制造生物可降解包装材料的新来源。ZHANG 等^[45]对近年来菜籽蛋白应用于食品包装的研究进行了总结, 对比了菜籽蛋白基包装材料与其他植物蛋白基生物塑料在机械性能、隔热性能、透水性能和薄膜形态等方面的差异, 发现两者具有相当的机械性能和防潮性能。菜籽蛋白基薄膜能够应用于食品包装或进行热封形成各种型号的包装袋^[46], 以容纳或保藏食品及加工配料, 并且在其他增塑剂的共同作用下, 可有效抑制水分、氧气、香味和其他挥发性成分的迁移^[47-48]。

3.3 胶凝剂

随着植物蛋白在凝胶类产品中的广泛使用, 作为关键功能特性之一的凝胶作用在过去的 20 年中得到了深入研究。SIBT-E-ABBAS 等^[49]在研究菜籽蛋白凝胶能力时发现, 在蛋白质浓度 10% 时, 菜籽蛋白能够形成部分凝胶, 当浓度达到 14% 时, 可得到强而稳定的凝胶。菜籽蛋白形成的凝胶大多是热诱导凝胶, 尤其是在碱性条件下所形成的凝胶更为稳定, 清蛋白在 pH 10、温度为 80℃ 时, 形成了一个具有极端协同作用的凝胶网络结构^[50], 相比之下, 球蛋白形成的凝胶要比清蛋白更强, 且最大凝胶强度在中性 pH 左右^[13]。在这些形成的凝胶中, 加热能够部分或完全展开球状蛋白质的固有结构, 使蛋白质的埋藏结构域能够在分子间通过氢键、疏水相互作用和二硫键等形成稳定的三维矩阵或网络结构^[8]。在开发与生产香肠、调味酱和果酱等产品中, 加入菜籽蛋白作为胶凝剂以增加产品的品质与口感, 其次由菜籽蛋白制备的凝胶亦可应用于各种非食品用途, 如生物传感器、组织工程或医疗敷料等^[8]。

3.4 乳化剂

在食品工业中, 绝大多数植物蛋白乳化剂来源于大豆, 由于对大豆中过敏原的担忧, 研发人员正在寻找其他替代品^[51], 而 CHEUNG 等^[52]已经证明菜籽蛋白中球蛋白和清蛋白具有良好的乳化性能, 且球蛋白表现出比清蛋白和大豆蛋白更好的乳化性能。TAN 等^[53]分别研究了菜籽蛋白和球蛋白组分的乳化性, 结果表明这些组分中的蛋白质在 pH 为 4、7 和 9 时能够形成乳状液, 并且乳化能力 (1000~1800 mL/g) 明显高于通过碱液萃取或酸化沉淀 (pH 4) 制备的菜籽蛋白混合物 (500~800 mL/g)、商品化的大豆分离蛋白 (500~1500 mL/g)。因此基于良好的乳化性能, 菜籽

蛋白可能是一个具有前景的作为乳化剂的植物蛋白质来源, 在沙拉酱、蛋黄酱、冰淇淋、饮料和酱料等加工中具有很大的实际意义^[38]。

4 结束语

菜籽蛋白是源于菜籽饼粕中的一类不存在限制性氨基酸的优质蛋白, 具有较高的生物利用度和消化率, 作为经济和可持续的蛋白质来源, 将会成为大豆蛋白之后新的植物蛋白替代品。对于菜籽蛋白质的利用也是一个巨大的尚未开发的价值链, 基于菜籽蛋白的功能特性及营养功效, 提高其在食品加工领域的利用价值, 能够不断降低油脂加工工业碳排放, 减少动物源性蛋白质消费, 促进广大消费者健康饮食方式, 提升对生物经济产生的贡献。

参考文献

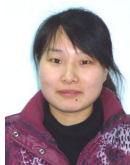
- [1] 国家统计局. 年度数据 [DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E6%B2%B9%E8%8F%9C> [2022-03-17]. State Statistics Bureau. Annual data [DB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E6%B2%B9%E8%8F%9C> [2022-03-17].
- [2] JIA W, RODRIGUEZ-ALONSO E, BIANEIS M, *et al.* Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2021, 68: 102636.
- [3] STBRING K, NILSSON K, AHLSTRM C, *et al.* Emulsifying and anti-oxidative properties of proteins extracted from industrially cold-pressed rapeseed press-cake [J]. *Foods*, 2020, 9(5): 678.
- [4] LAN M, FU Y, DAI H, *et al.* Encapsulation of β -carotene by self-assembly of rapeseed meal-derived peptides: Factor optimization and structural characterization [J]. *LWT*, 2020, 138: 110456.
- [5] 孙佩佩, 周晓容, 宋代军, 等. 发酵菜籽粕替代豆粕饲喂生长猪对其生长性能、血清生化指标、抗氧化能力和免疫功能的影响 [J]. *动物营养学报*, 2019, 31(2): 874-882. SUN PP, ZHOU XR, SONG DJ, *et al.* Effects of fermented rapeseed meal to replace soybean meal in diets on growth performance, serum biochemical indexes, antioxidant ability and immunology function of growing pigs [J]. *J Anim Nutr*, 2019, 31(2): 874-882.
- [6] 于爽. 不同来源菜籽粕的肉鸭代谢能评定及蛋白酶对其能值的影响研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2020. YU S. Study on the evaluation of metabolizable energy of rapeseed meal from different sources and effect of protease on its energy value in meat duck [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [7] TAN SH, MAILER RJ, BLANCHARD CL, *et al.* Canola proteins for human consumption: extraction, profile, and functional properties [J]. *J Food Sci*, 2011, 76(1): 16-18.
- [8] WANASUNDARA JPD, MCINTOSH TC, PERERA SP, *et al.* Canola/rapeseed protein-functionality and nutrition [J]. *OCL*, 2016, 23(4): 407.
- [9] WANASUNDARA JPD, TAN S, ALASHI AM, *et al.* Proteins from canola/rapeseed: Current status [M]. United States: Academic Press, 2016.
- [10] KOTECKA-MAJCHRAK K, SUMARA A, FORNAL E, *et al.* Oilseed proteins-properties and application as a food ingredient [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 106: 160-170.

- [11] KORUS J, CHMIELEWSKA A, WITCZAK M, *et al.* Rapeseed protein as a novel ingredient of gluten-free bread [J]. *Eur Food Res Technol*, 2021, 247: 2015–2025.
- [12] 翟晓娜, 汪涛, 梁亮, 等. 菜籽粕蛋白的碱溶酸沉工艺优化及其活性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 164–171.
- ZHAI XN, WANG T, LIANG L, *et al.* Study on optimization and activities of rapeseed meal protein by alkali-extraction and acid-precipitation [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(9): 164–171.
- [13] CHMIELEWSKA A, KOZOWSKA M, RACHWA D, *et al.* Canola/rapeseed protein-nutritional value, functionality and food application: A review [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2021, 61(22): 3836–3856.
- [14] SARI YW, BRUINS ME, SANDERS J. Enzyme assisted protein extraction from rapeseed, soybean, and microalgae meals [J]. *Ind Crop Prod*, 2013, 43: 78–83.
- [15] DÜRING K, TRESSEL RP, SCHULZE B, *et al.* Method for obtaining napin and cruciferin or a mixture thereof from rapeseed: Germany, WO/2015/154884 [P]. 2015-10-15.
- [16] FETZER A, MÜLLER K, SCHMID M, *et al.* Tackling correlated responses during process optimisation of rapeseed meal protein extraction [J]. *Food Chem*, 2015, 170: 62–73.
- [17] FETZER A, MÜLLER K, SCHMID M, *et al.* Rapeseed proteins for technical applications: Processing, isolation, modification and functional properties-A review [J]. *Ind Crop Prod*, 2020, 158: 112986.
- [18] 翟晓娜, 师建芳, 赵慧凝, 等. 菜籽饼粕蛋白的提取、功能特性及其在食品中应用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(12): 389–397.
- ZHAI XN, SHI JF, ZHAO HN, *et al.* Extraction, functional properties and food applications of rapeseed meal protein isolates [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(12): 389–397.
- [19] DAY L. Proteins from land plants-Potential resources for human nutrition and food security [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2010, 32(1): 25–42.
- [20] 熊建, 马海乐, 董亚婷, 等. 单仓高效平筛制备菜籽浓缩蛋白的研究[J]. *中国油料作物学报*, 2018, 40(3): 432–437.
- XIONG J, MA HL, DONG YT, *et al.* Preparation of rapeseed concentrated protein by high performance flat sieve [J]. *Chin J Oil Crop Sci*, 2018, 40(3): 432–437.
- [21] 刘玉兰, 严佑君, 马宇翔, 等. 高温菜籽粕醇洗制取饲用浓缩蛋白工艺条件的研究[J]. *中国油脂*, 2013, 38(8): 14–17.
- LIU YL, YAN YJ, MA YX, *et al.* Preparation of feed protein concentrate from high-temperature rapeseed meal by ethanol extraction [J]. *China Oils Fats*, 2013, 38(8): 14–17.
- [22] VINCENT D, YOHAN D, JEAN R, *et al.* Treatment of hypertension with renin-angiotensin system inhibitors and renal dysfunction: A systematic review and meta-analysis [J]. *Am J Hypertens*, 2012, (1): 126–132.
- [23] PRESIDENT MAFD. Hypertension treatment update: Focus on direct renin inhibition [J]. *J Am Acad Nurse Pract*, 2011, 23(5): 239–248.
- [24] RAO S, SUN J, LIU Y, *et al.* ACE inhibitory peptides and antioxidant peptides derived from *in vitro* digestion hydrolysate of hen egg white lysozyme [J]. *Food Chem*, 2012, 135(3): 1245–1252.
- [25] MÄKINEN S, JOHANNSON T, GERD EV, *et al.* Angiotensin I-converting enzyme inhibitory and antioxidant properties of rapeseed hydrolysates [J]. *J Funct Foods*, 2012, 4(3): 575–583.
- [26] SONKLIN C, ALASHI MA, LAOHAKUNJIT N, *et al.* Identification of antihypertensive peptides from mung bean protein hydrolysate and their effects in spontaneously hypertensive rats [J]. *J Funct Foods*, 2020, 64: 103635.
- [27] CHIRINOS R, PEDRESCHI R, CAMPOS D, *et al.* Enzyme-assisted hydrolysates from sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) protein with *in vitro* antioxidant and antihypertensive properties [J]. *J Food Process Pres*, 2020, 12(44): 14969.
- [28] 王凤章, 杨毅杰, 何荣, 等. 菜籽肽的 ACE、肾素抑制活性及抗氧化性研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(5): 50–56.
- WANG FZ, YANG YJ, HE R, *et al.* Research of rapeseed peptides' ACE, renin inhibition and antioxidant activity [J]. *J Cere Oils Ass*, 2017, 32(5): 50–56.
- [29] NIOI C, KAPEL R, RONDAGS E, *et al.* Selective extraction, structural characterisation and antifungal activity assessment of napins from an industrial rapeseed meal [J]. *Food Chem*, 2012, 134(4): 2149–2155.
- [30] DUAN X, ZHANG M, CHEN F, *et al.* Prediction and analysis of antimicrobial peptides from rapeseed protein using *in silico* approach [J]. *J Food Biochem*, 2021, 45: e13598.
- [31] TAN P, FU H, MA X, *et al.* Design, optimization, and nanotechnology of antimicrobial peptides: From exploration to applications [J]. *Nano Today*, 2021, 39: 101229.
- [32] LAMMI C, AIELLO G, BOSCHIN G, *et al.* Multifunctional peptides for the prevention of cardiovascular disease: A new concept in the area of bioactive food-derived peptides [J]. *J Funct Foods*, 2019, 55: 135–145.
- [33] 赵蓓, 李欣蓉, 魏瑞芝, 等. 超声辅助提取对菜籽清蛋白抗氧化活性的影响[J]. *食品科技*, 2015, 40(8): 235–239.
- ZHAO B, LI XR, WEI RZ, *et al.* Effect on the antioxidant activity of rapeseed albumin of ultrasonic-assisted extraction [J]. *Food Sci Technol*, 2015, 40(8): 235–239.
- [34] ZHOU C, YU X, QIN X, *et al.* Hydrolysis of rapeseed meal protein under simulated duodenal digestion: Kinetic modeling and antioxidant activity [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2016, 68(9): 523–531.
- [35] KIM SK, WIJESEKARA I. Development and biological activities of marine-derived bioactive peptides: A review [J]. *J Funct Foods*, 2010, 2(1): 1–9.
- [36] WANG L, YANG J, WANG Y, *et al.* Study on antioxidant activity and amino acid analysis of rapeseed protein hydrolysates [J]. *Int J Food Prop*, 2016, 19(9): 1899–1911.
- [37] BELOVIĆ MM, MASTILOVIĆ JS, TORBICA AM, *et al.* Potential of bioactive proteins and peptides for prevention and treatment of mass non-communicable diseases [J]. *Food Feed Res*, 2011, 38(2): 51–61.
- [38] AIDER M, BARBANA C. Canola proteins: Composition, extraction, functional properties, bioactivity, applications as a food ingredient and allergenicity-a practical and critical review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2011, 22(1): 21–39.
- [39] 刘玉兰, 石龙凯, 胡月, 等. 高温菜籽粕醇洗浓缩蛋白营养生理学研究评价[J]. *中国油脂*, 2014, 39(4): 30–34.
- LIU YL, SHI LK, HU Y, *et al.* Nutritional physiology of high temperature alcohol washed rapeseed protein concentrate [J]. *China Oils Fats*, 2014, 39(4): 30–34.
- [40] RUBIO NR, XIANG N, KAPLAN DL. Plant-based and cell-based approaches to meat production [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 6276.
- [41] SCHREUDERS F, DEKKERS BL, BODNAR I, *et al.* Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue

- preparation [J]. *J Food Eng*, 2019, 261: 32–39.
- [42] BANOVIC M, SVEINSDÓTTIR K. Importance of being analogue: Female attitudes towards meat analogue containing rapeseed protein [J]. *Food Control*, 2021, 123: 107833.
- [43] ASGAR MA, FAZILAH A, HUDA N, *et al*. Nonmeat protein alternatives as meat extenders and meat analogs [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2010, 9(5): 513–529.
- [44] JIA W, CURUBETO N, RODRIGUEZ-ALONSO E, *et al*. Rapeseed protein concentrate as a potential ingredient for meat analogues [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2021, 72: 102758.
- [45] ZHANG Y, LIU Q, REMPEL C. Processing and characteristics of canola protein-based biodegradable packaging: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(3): 475–485.
- [46] JANG SA, LIM GO, SONG KB. Preparation and mechanical properties of edible rapeseed protein films [J]. *J Food Sci*, 2015, 76(2): 218–223.
- [47] MANAMPERI WA, ESPINOZA-PEREZ JD, HAAGENSEN DM, *et al*. Influence of oil extraction method on properties of canola biodiesel, epoxies, and protein-based plastics [J]. *Ind Crop Prod*, 2015, 77: 133–138.
- [48] MANAMPERI W, CHANG S, ULVEN CA, *et al*. Plastics from an improved canola protein isolate: Preparation and properties [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2010, 87(8): 909–915.
- [49] SIBT-E-ABBAS M, BUTT MS, KHAN MR, *et al*. Nutritional and functional characterization of defatted oilseed protein isolates [J]. *Pak J Agric Sci*, 2020, 57(1): 219–228.
- [50] SCHWENKE KD, DAHME A, WOLTER T. Heat-induced gelation of rapeseed proteins: Effect of protein interaction and acetylation [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 1998, 75(1): 83–87.
- [51] ARRUTIA F, BINNER E, WILLIAMS P. Oilseeds beyond oil: Press cakes and meals supplying global protein requirements [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 100: 88–102.
- [52] CHEUNG L, WANASUNDARA J, NICKERSON MT. Effect of pH and NaCl on the emulsifying properties of a napin protein isolate [J]. *Food Biophys*, 2015, 10(1): 1–9.
- [53] TAN SH, MAILER RJ, BLANCHARD CL, *et al*. Emulsifying properties of proteins extracted from Australian canola meal [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 57(1): 376–382.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



李哲斌, 硕士, 主要研究方向为食品加工技术与开发。
E-mail: lizhebin7643@163.com