DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.16.028

绿豆皮活性成分提取、功能及应用的研究进展

李美琦[1],刘玉茜[1],孙亮[2],李大鹏[1*]
(1. 山东农业大学 食品科学与工程学院 山东省高校食品加工技术与质量控制重点实验室,山东 泰安 271000; 2. 黄岛海关,山东 青岛 266400)

摘　要:绿豆及其制品是人们广泛食用的一种豆类商品。绿豆皮作为绿豆加工废弃物,具有较高的营养价值和应用前景,得到了许多学者的关注。该文综述绿豆皮活性成分的功效、提取技术、营养功能研究及应用现状,对绿豆皮深加工再利用的研究方向和应用前景进行展望。

关键词:绿豆皮;黄酮;膳食纤维;营养功能;研究进展

Research Progress on Extraction, Functions, and Applications of Active Components from Mung Bean Hull

LI Mei-qi[1], LIU Yu-qian[1], SUN Liang[2], LI Da-peng[1*]
(1.Key Laboratory of Food Processing Technology and Quality Control in Universities of Shandong Province, College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, Shandong, China; 2. Huangdao Customs, Qingdao 266400, Shandong, China)

Abstract: Mung beans are among the most popular of legumes, used in multiple food products with high nutritional value. Mung bean hulls are considered to be a waste product of mung bean processing, despite high nutritional value and various prospective applications. This apparent waste is of concern to many scholars. Extraction technologies and their efficacy, nutritional function studies, and the application status of bioactive components from mung bean hulls were reviewed, and prospective research directions and applications of mung bean hull components were discussed.

Key words: mung bean hull; flavone; dietary fiber; nutritional function; research progress

引文格式:
李美琦,刘玉茜,孙亮,等. 绿豆皮活性成分提取、功能及应用的研究进展[J]. 食品研究与开发,2021,42(16):190-198.
LI Meiqi, LIU Yuqian, SUN Liang, et al. Research Progress on Extraction, Functions, and Applications of Active Components from Mung Bean Hull[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 190-198.

绿豆是喜温的豆科草本作物,主要在温带、亚热带和热带地区种植[1],2019 年全球绿豆产量为 2 698.20 万吨,我国绿豆产量为 57.30 万吨,居世界前列。绿豆营养成分多,药用价值高,广泛应用于食品工业、酿造工业和医药工业等行业[2-3]。

绿豆皮是包围在胚和胚乳外部的保护组织,是绿豆粉丝、绿豆芽及绿豆糕等产品生产过程中的主要废弃物,占绿豆重量的 7%~10%。研究发现,100 g 绿豆皮含膳食纤维(65.85±0.97) g、淀粉(4.78±0.98)g、粗蛋白质(10.33±1.20)g、水分(14.85±0.60)g、灰分(1.60±0.20) g、脂肪(0.28±0.06)g[4]。此外,绿豆皮中还含有丰富的活性物质,主要有膳食纤维、黄酮类化合物、多糖和色素等,

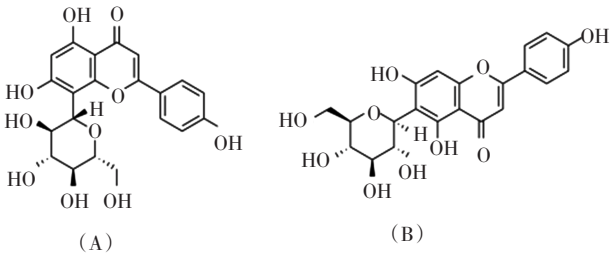
基金项目:国家自然科学基金(31972070)
作者简介:李美琦(1996—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食品营养与人类健康。
* 通信作者:李大鹏(1973—),男(汉),教授,研究方向:食品营养与人类健康。

具有抗氧化、降血脂和降血糖等健康功效[5-6]。目前，绿豆加工后的绿豆皮一般被当作废弃物用于饲料、肥料和枕头填充，缺乏对其活性功能特性的深度应用[7]。近年来绿豆皮活性功能成分的研究得到了越来越多的关注。因此，本文综述了绿豆皮活性成分的提取，功能和应用的研究现状，以期为绿豆皮相关产品的开发和高值化利用提供参考。

1 绿豆皮活性成分及提取技术

1.1 黄酮类化合物

绿豆皮中黄酮类化合物含量丰富[8]。程霜等[9]初步确定了绿豆皮中黄酮类化合物的 3 种组分（3,5,7,3′,4′-五羟基黄酮醇、3,6,7,3′,4′-五羟基黄酮醇或3,7,8,3′,4′-五羟基黄酮醇和 5,7-羟基双氢黄酮或是它们的衍生物等）。随后，Luo 等[6]发现牡荆素和异牡荆素是绿豆皮中含量最多的黄酮类化合物，且不存在于绿豆仁中[10]。牡荆素和异牡荆素分子结构示意图见图 1。



A 牡荆素；B 异牡荆素。

图 1 牡荆素和异牡荆素分子结构示意图

Fig.1 Molecular structure of vitexin and isovitexin

近年来，多种现代提取技术被应用于绿豆皮黄酮类化合物的分离纯化，如超临界 CO_2 技术萃取[11]、超声-微波辅助萃取[12-13]、超声波-酶法辅助提取[14]、真空耦合超声波[15]等。受料液比、提取次数和时间以及提取方法等因素影响，绿豆皮总黄酮的提取量约为 6.90 mg/g~18.90 mg/g[16]，类黄酮的提取量最大为 13.75 mg/g[17]，牡荆素的提取量最大为 1.97 mg/g[12]。现代提取技术的效率远优于传统提取技术，但也存在低环保、高成本等弊端，比如超声提取技术受超声波衰减因素的约束，会在直径过大的提取罐周壁形成超声空白区，还造成噪音污染。目前，多种提取技术联合成为改善单一提取技术弊端的趋势，杜冠尚等[12]采用超声和微波技术联合乙醇浸提绿豆皮黄酮类化合物，既能利用微波消除超声空白区，又能大大缩短超声时间，减少噪声污染。

绿豆皮黄酮类化合物主要采用大孔树脂进行纯化处理。康维良等[13,18-19]发现 AB-8 型是纯化绿豆皮黄酮较好的大孔树脂，罗磊等[20]发现 NKA-9 型大孔树脂也具有较好的纯化效果。大孔树脂纯化后可以将绿豆皮中被包裹的片状和粉粒状颗粒大部分释放出来，且纯化后的绿豆皮黄酮比粗提物的抗氧化能力更强[21]。由此可见，绿豆皮黄酮类化合物的纯化过程会影响绿豆皮抗氧化活性的强弱。因此，在实际生产中要根据实际情况和分析要求来制定相应的提取纯化方法，应尽量采用专属性、经济性和环保性更强的方法。

1.2 多糖

绿豆皮多糖中糖醛酸含量适中、中性糖含量丰富，热稳定性好[1]。Lai 等[22]和 Zhong 等[23]提取分离绿豆皮多糖均得到两个多糖组分，发现其主要的单糖组分分别为甘露糖以及鼠李糖和半乳糖、甘露糖和半乳糖以及鼠李糖和半乳糖。

近年来，绿豆皮多糖的提取技术主要有热水碱提[24]、超声辅助提取[25]、纤维素酶辅助提取[26]和真空耦合超声波提取法[27]等。安启源等[24]发现在料液比为 1∶20（g/mL），提取温度为 80 ℃，浸提时间为 1.5 h，碱浓度为 0.20 mol/L 的工艺条件下，绿豆皮中多糖的产率为 6.22%；黄静文等[26]在最佳提取条件下，对比了热水碱提法、超声波辅助法和纤维素酶法提取绿豆皮中多糖的效果，发现纤维素酶法提取绿豆皮多糖的效果较好；然而闵甜等[25]发现在 pH4.6 条件下，155 W 超声提取 40 min，绿豆皮水溶性多糖的得率可达到 8.54%。由此猜测多糖得率可能受多种因素影响。总之，寻找最佳提取技术下的最佳工艺条件是绿豆皮多糖广泛应用的重要前提。

1.3 膳食纤维

膳食纤维是一种不能被胃肠消化吸收的多糖，分为可溶性膳食纤维和不可溶性膳食纤维，具有抗氧化、降血脂、降血糖等多种生理功能。绿豆皮不可溶性膳食纤维中海藻糖和木糖含量高，不含有果糖，纤维素含量最高，约占 32.84%[28]；而绿豆皮可溶性膳食纤维中核糖和甘露糖含量高，纤维素和半纤维素发生了降解。与绿豆皮不可溶性膳食纤维和总膳食纤维相比，绿豆皮可溶性膳食纤维具有更好的保水能力、吸水膨胀力，较低的持油力[29]。

绿豆皮不溶性膳食纤维通常采用传统碱法进行提取[30]，主要是因为酸提取法提取不溶性膳食纤维的得率和纯度分别为 23%和 12%，远远低于碱提取法（得率和纯度分别为 64%和 90%），所以酸提取法并不适用于提取绿豆皮中的不溶性膳食纤维[31]。除此以外，超声波辅助碱法[32]和超声波-微波联合辅助碱提取法[33]等现代提取方法也用于提取绿豆皮中的不溶性膳

食纤维。与传统碱法相比，现代提取方法能大大缩短提取时间，提高绿豆皮不溶性膳食纤维的得率。

绿豆皮可溶性膳食纤维经碱法制备，经过工艺优化得出最佳提取条件为：pH11.0，时间 95 min，温度 75 ℃，料液比 1∶14（g/mL），得率为 4.77%[29]。而罗磊等[34]用超微粉碎技术辅助酶法用超微粉粒度、酶解时间和酶底比的最优条件提取绿豆皮可溶性膳食纤维的得率为 14.02%。综上所述，超微粉碎技术辅助酶法在绿豆皮可溶性膳食纤维的提取率和提取时间等方面远远优于碱法制备。

不同加工处理技术改变绿豆皮膳食纤维的含量和性质。发芽后的绿豆皮中总膳食纤维含量增加 3.40%，可溶性膳食纤维含量增加 13.62%，绿豆皮膳食纤维的功能性质也得到了部分改善[35]。单螺杆挤出[36]和双螺杆挤压[37]绿豆皮能破坏结构的致密性，提高可溶性膳食纤维的含量，但挤出改性处理不会破坏绿豆皮膳食纤维内部的分子结构，保护了官能团，进而提高了绿豆皮可溶性膳食纤维的理化性质（膨胀力、吸水力以及持水力等）。因而，研究膳食纤维含量和性质的影响因素对开发和应用绿豆皮膳食纤维具有指导意义。

1.4 色素类

在我国大众的消费观念中，绿豆为绿种皮，但印度等国家消费量相对较大是黄种皮的绿豆。此外，绿豆还有黑、褐等其它种皮色。绿豆籽粒颜色是绿豆的形态学标记[38]，取决于细胞核遗传，由 2 对独立基因控制，且其中 1 对基因起显性上位作用[39]。研究发现，绿豆皮颜色与色素种类和含量有关，绿色物质主要是叶绿素 a[40]，黄色物质主要是牡荆素和异牡荆素[41]。同时，绿豆皮颜色也与其黄酮含量之间存在相关性，绿种皮绿豆的黄酮含量低于黑种皮绿豆，高于黄种皮绿豆[42]。

CO_2 超临界萃取法、超声辅助提取和微波-超声波协同提取法等现代提取技术广泛用于提取绿豆皮色素[43-45]。王传虎等[43]发现萃取压力 30 MPa、萃取温度 40 ℃、萃取时间 80 min、CO_2 流量 50 kg/h、95%乙醇作为夹带剂的工艺条件下，绿豆皮色素得率 4.86 mg/100 g。于畅[44]等采用乙醇溶剂浸提和超声辅助提取醇提绿豆皮色素，发现超声辅助提取法能提高绿豆色素的得率。因此，现代提取技术提取绿豆皮色素具有明显优势，显示出极佳的应用前景。

pH 值、提取温度、金属离子等加工处理方式对色素有巨大的影响。花丹等[40]发现随着 pH 值低至 7 以下，温度升高至 90、100 ℃时，叶绿素降解和颜色损失加快[40]；Fe^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+}等金属离子对绿豆皮色素稳定性影响较大，遇 Cu^{2+}、Zn^{2+}离子分别有沉淀生成；随氧化剂的增大，色素吸光度有变小趋势，这可能是氧化剂破坏绿豆皮色素中的不饱和键所致，还原剂对该色素吸光度的影响很小[45]。在煮制绿豆清汤时加入白砂糖和小苏打会降低其抗氧化能力，加入食盐可以增加其抗氧化活性[46]。综上所述，不同处理方式会影响色素的降解速率、结构性质和生理功能，所以研究色素理化性质的影响因素尤为重要。

总之，绿豆皮中的黄酮、多糖等天然活性成分，含量丰富且提取技术多样，值得国内外学者持续关注和研究。绿豆皮活性成分含量及提取方法见表 1。

表 1 绿豆皮活性成分含量及提取方法

Table 1 Content and extraction method of active components in mung bean hull

活性成分	含量	提取方法
黄酮类化合物	3.88 mg/g~42.90 mg/g	有机溶剂提取法、超声-微波辅助、超临界 CO_2 萃取等
多糖	23.60 mg/g~85.90 mg/g	热水浸提、纤维素酶法、真空耦合超声波提取等
膳食纤维	0.62 g/g~0.68 g/g	碱提取法、酶碱共处理法、超微粉碎技术辅助酶等
色素	48.60 μg/g	微波-超声波协同提取、超声辅助、超临界 CO_2 萃取等

2 活性功能

2.1 改善肠道菌群

小鼠饮食中补充绿豆皮能显著降低高脂饮食引起的肥胖，改善肠道微生物群失调化[47]。随后宋倩倩[1]发现绿豆皮多糖灌胃 Balb/c 小鼠增加了结肠长度，以及小鼠肠道内厚壁菌门、拟杆菌属、梭菌属，降低 TM7 菌门，提高肠道菌落的丰富度，调节肠道菌群的构成，有助于维持肠道健康。由此推测，绿豆皮改善肠道健康主要是绿豆皮多糖起作用，但多糖在肠道菌群的作用机理复杂，存在多种可能性。

2.2 免疫活性

绿豆皮水提物显著提高致死性全身炎症的小鼠存活率，剂量依赖性地减弱脂多糖诱导的小鼠单核巨噬细胞白血病（RAW264.7）细胞中高迁移率族蛋白 B1（high mobility group protein，HMGB1）和几种趋化因子（LC3-Ⅰ和 LC3-Ⅱ）的释放，对致死性脓毒症具有保护作用[48]。研究发现，绿豆皮的免疫调节作用主要归因于黄酮类化合物的抗氧化作用。绿豆皮黄酮类化合物能保护经脂多糖刺激的 RAW264.7 细胞，调控干扰素应答抗病毒酶、抗原处理因子以及与蛋白酶体降解相关的蛋白质，促进对辅助型 T 细胞 2 免疫反应的极化[49]。因此，绿豆皮免疫调节与氧化应激的关系是绿豆

皮免疫活性的重要研究方向。

2.3 降血糖活性

研究发现,95%的绿豆皮乙醇提取物对小鼠α-葡萄糖苷酶的抑制率为48.6%,能降低2型糖尿病小鼠肝脏中血糖、糖化血红蛋白水平[50],且含有绿豆皮的全绿豆能显著降低小鼠空腹血糖和空腹血清胰岛素水平,并降低血脂和糖化血清蛋白水平[51]。Yao和Xu等[41,52]发现绿豆中的D-手性肌醇(D-chiro-inositol,DCI)、牡荆素和异牡荆素对糖尿病患者有良好的治疗作用。研究表明,绿豆皮中DCI通过PI3K/AKT信号通路[53]干预高血糖疾病,但其他活性成分的具体作用位点及分子机制尚不明确。

2.4 降血脂活性

绿豆皮水提物能减轻孕酮激素引起的雌性C57BL/6J小鼠体内脂质代谢相关蛋白丰度的变化,并下调肝脏中肉毒碱棕榈酰基转移酶1A(carnitine palmitoyltransferase 1 A,CPT1A)、醛酮还原酶家族1成员B(aldo-keto reductase family 1 B,AKR1B)和胆固醇调节元件结合蛋白1(sterol regulatory element binding protein 1,SREBP-1)的表达,并预测可能是通过调节产后恢复期的脂质合成发挥作用[54]。罗磊等[34]发现绿豆皮可溶性膳食纤维可减少高脂血症小鼠肝组织细胞中脂质的积累,防止非酒精性脂肪肝的发生,推测绿豆皮可溶性膳食纤维可能是通过促进肝脏脂蛋白脂酶(lipoprteinlipase,LPL)和肝脂酶(hepaticlipase,HL)活性以及粪便脂质和胆汁酸的排泄,进而通过降血脂作用保护肝脏。杨末[29]的研究结果进一步证实可溶性膳食纤维具有抑制胆固醇和胆酸钠的吸附能力,且抑制效果显著高于不可溶性膳食纤维和总膳食纤维。由此猜测,绿豆皮的降血脂活性主要依赖于绿豆皮中的可溶性膳食纤维,但绿豆皮干预机体血脂平衡的调控机制还需进一步明确。

2.5 抗氧化活性

大量研究成果证实,绿豆皮具有抗氧化活性。4 mg/mL的绿豆皮可溶性膳食纤维对1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基和羟基自由基均表现出较强的清除率[55],胡梁斌等[56]分离的绿豆皮水溶性色素的清除率可达70%~80%,且绿豆皮的体外抗氧化能力优于鹰嘴豆种皮,而低于木豆种皮[57]。在H_2O_2诱导的人脐静脉内皮(human umbilical vein endothelial cells,HUVEC)细胞模型中,罗磊等[58]发现绿豆皮黄酮具有清除氧自由基、提高机体抗氧化酶活性、保护受损细胞的功效。他们还在D-半乳糖衰老小鼠模型中发现绿豆皮可溶性膳食纤维可以降低血清和肝组织中丙二醛(malondialdehyde,MDA)含量,提高过氧化氢酶(catalase,CAT)、总超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase,GSH-Px)活力[59]。在热应激处理的大鼠模型中,绿豆皮水提物显著降低血浆中MDA水平和乳酸脱氢酶、一氧化氮合酶活性,而显著提高总抗氧化和谷胱甘肽水平[60]。绿豆皮也被证实可以干预氧化应激相关的疾病。Jang等[50]发现95%的绿豆皮乙醇提取物提高了2型糖尿病小鼠肝脏中SOD、CAT和GSH-Px的活性,有效改善2型糖尿病患者的高血糖和抗氧化状态;陶明芳等[61]研究发现绿豆皮中的异牡荆素提高应激条件下秀丽隐杆线虫体内抗氧化酶活力,减少体内活性氧的累积。综上,绿豆皮活性成分均表现出抗氧化能力,但对氧化应激相关疾病营养干预的机理还需进一步深入研究。

2.6 延缓衰老

绿豆水溶性色素能够明显诱导HepG2细胞的凋亡,延缓人体正常细胞衰老,对肝脏具有保健作用[56]。陶明芳等[61]研究发现绿豆皮中的异牡荆素保护秀丽隐杆线虫并延长秀丽隐杆线虫的寿命,推测可能是通过胰岛素信号途径调节应激状态下秀丽隐杆线虫的衰老过程。但其它实验模型下绿豆皮活性成分延缓衰老的生理功能尚不清楚,延缓衰老的机制尚不明确,因此研究绿豆皮延缓细胞衰老仍是热点。

3 应用

3.1 制作功能食品

绿豆皮被广泛应用于食品中,涉及食品添加剂、面点、饮料等各个领域。Mushtaq等[62]发现经绿豆皮发酵得到的木糖醇能改善肥胖小鼠的血清生化特性,干预肥胖和糖尿病;以绿豆皮为发酵底物,经酵母菌株粘枝红假单胞菌(MTCC-1403)生产的可食用色素增强了色素食品(硬糖和果冻)的抗氧化活性[63]。绿豆皮作为食品添加剂的来源,能广泛应用于各类食品加工过程,赋予其绿豆皮的抗氧化、抗血糖等功能活性,有着不可预测的拓展空间。

绿豆皮还应用于特色面点的制作。No等[64-65]用全绿豆淀粉取代去壳绿豆淀粉制作韩国传统食物——绿豆凉粉,发现其具有更高的蛋白质和膳食纤维含量,更好的感官弯曲性能和平滑度,具有更强的抗氧化活性。李可心等[66]以绿豆皮为原料,研制出外表轻微焦糖色,内部淡绿色泽,香气浓郁的绿豆皮低糖戚风蛋糕。邹国文等[67]以绿豆皮粉、高筋面粉等为主要原料,采用二次发酵法,研制出膳食纤维丰富,风味品质

佳,形态丰满完整,组织有弹性的杂粮面包。总之,绿豆皮能明显改善面点食品的理化特性和感官品质,赋予其抗氧化的营养功能,具有广阔的研究前景。

绿豆皮在饮料行业也具有广阔的应用前景。王晓英等[68]以 25%的蒲公英提取液和 20%的绿豆皮提取液研制出具有清热解暑、降压明目、利尿消肿等功效保健饮料,随后以金银花、绿豆皮纤维为主要原料研制出金银花绿豆保健饮料,其中绿豆皮纤维含量为 8 g/100 mL[69];Zhong 等[23]以绿豆皮为主料,金银花和绿茶为辅料,研制出绿豆皮清凉饮料;马永哲等[70]以绿豆皮和全脂乳粉为原料,研制出口感细腻,色泽均匀,风味独特的绿豆皮发酵酸奶, 能有效清除机体自由基。目前,绿豆皮研究主要以赋予饮料特有的功能活性为主,绿豆皮对饮料理化性质的影响也将会是绿豆皮研究的重要方向,对指导绿豆皮在饮料行业的研发和生产有重要意义。

3.2 制作化学材料

绿豆皮能作为化学材料用于食品包装。林亚楠[71]将提取出的绿豆皮可溶性膳食纤维(0.06%)引入包覆茶多酚纳米乳, 使其多糖大分子与负电性海藻酸钠、正电性的壳聚糖及钙离子静电吸附交联制得 W/O/W 型包覆纳米乳,研制出功能性控释薄膜,可用于改善鱼松形态结构,赋予鱼松良好的感官,提高有效控制鱼松贮藏期间的水分活度。马中苏等[72]用硫酸水解绿豆皮纤维素制备出绿豆纳米纤维素,并将它应用到浓缩乳清蛋白可食用膜中,因其稳定的纤维素Ⅰ型结构能提高膜的性能。因此,作为食品包装的化学材料,绿豆皮具有广阔的研究前景。

Song 等[73]以绿豆皮生物质废弃物为资源,采用热解、水热法结合氢氧化钾活化的方法合成了一系列多孔碳基超级电容器电极材料,在形成三维层次化多孔结构碳中起至关重要的作用。Yuan 等[74]从豆科植物皮(包括绿豆皮)中提取生物炭,既能纠正土壤酸度,又能提高土壤肥力。这说明绿豆皮在新能源电子和环保等方面具有广阔的应用前景。

4 结论与展望

绿豆皮中丰富的黄酮、多糖、色素和膳食纤维,具有抗氧化、降血糖和改善肠道菌群等功能活性。绿豆皮加工成功能性产品,合理开发利用,将有广阔的发展前景和应用价值。与传统提取方式相比,现代提取技术有提取率高、有效成分损失少等优势,但也存在能耗高、成本高等缺陷。目前,多种现代技术联合提取能有助于改善单一现代提取技术的不足,但其工艺条件还有待进一步探究和实践。因此,探索更自动化更环保更低能耗的提取方式仍是绿豆皮活性成分提取产业努力发展的方向。

研究表明,绿豆皮的活性成分能预防和缓解多种疾病,但绿豆皮营养功能特性的作用机制还缺乏系统的研究。因此,深入研究绿豆皮活性成分的作用靶点,尤其是主成分牡荆素和异牡荆素干预各类疾病的作用机制,对于医药和功能食品开发具有指导意义。此外,绿豆皮膳食纤维具有改善肠道菌群和降血脂等多种生理活性,但加工技术对绿豆皮膳食纤维理化性质和生理功能的影响机制尚需要进一步研究,未来可以围绕膳食纤维内部的官能团与活性功能的关系展开研究, 为绿豆皮膳食纤维的开发利用提供理论依据。总之,通过系统深入地挖掘绿豆皮中活性成分的功能特性并将其应用到食品加工中,对于进一步提高绿豆产品附加值,拓展绿豆应用领域具有重要的意义。

参考文献:

[1] 宋倩倩. 绿豆多糖理化性质、抗氧化活性及其对小鼠肠道健康的影响 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
SONG Qianqian. Physical and chemical properties, antioxidant activity of mung bean polysaccharide and its effect on intestinal health of mice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.

[2] 王明海, 徐宁, 包淑英, 等. 绿豆的营养成分及药用价值[J]. 现代农业科技, 2012(6): 341–342.
WANG Minghai, XU Ning, BAO Shuying, et al. Nutritional components and medical value of *Vigna radiata* L.Wilclzek[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(6): 341–342.

[3] 戴高星. 发展绿豆生产大有可为[J]. 四川农业科技, 2011(6): 18–19.
DAI Gaoxing. Development of mung bean production has a great prospect[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2011(6): 18–19.

[4] 邓志汇, 王娟. 绿豆皮与绿豆仁的营养成分分析及对比[J]. 现代食品科技, 2010, 26(6): 656–659.
DENG Zhihui, WANG Juan. Comparison of nutrient components of mung bean hull and peeled mung bean[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(6): 656–659.

[5] ZHONG L Z, FANG Z X, WAHLQVIST M L, et al. Seed Coats of pulses as a food ingredient: Characterization, processing, and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 35–42.

[6] LUO J Q, CAI W X, WU T, et al. Phytochemical distribution in hull and *Cotyledon* of adzuki bean (*Vigna angularis* L.) and mung bean (*Vigna* radiate L.), and their contribution to antioxidant, anti-inflammatory and anti-diabetic activities[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 350–360.

[7] 朱文学, 焦昆鹏, 罗磊, 等. 绿豆皮黄酮的超声波辅助水提工艺优化及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 12–17.

ZHU Wenxue, JIAO Kunpeng, LUO Lei, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction and antioxidative activities of total flavonoids from mung bean(*Phaseolus radiatus*) hull[J]. Food Science, 2015, 36(16): 12-17.

[8] 张竞竞, 易建勇, 王宝刚, 等. 绿豆皮抗氧化物质的提取及初步分析[J]. 食品工业科技, 2008, 29(12): 64-66.
ZHANG Jingjing, YI Jianyong, WANG Baogang, et al. Extraction and analysis of antioxidants in mung bean hull[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(12): 64-66.

[9] 程霜, 杜凌云, 王勇, 等. 绿豆皮中抗氧剂的初步研究[J]. 中国粮油学报, 2000, 15(2): 40-43.
CHENG Shuang, DU Lingyun, WANG Yong, et al. Primary study on antioxidants in mung bean hull[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2000, 15(2): 40-43.

[10] LI A P, LI Z Y, JIA J P, et al. Chemical comparison of coat and kernel of mung bean by nuclear magnetic resonance-based metabolic fingerprinting approach[J]. Spectroscopy Letters, 2016, 49(3): 217-224.

[11] 张杨, 刘闯. 响应面优化超临界法萃取绿豆皮黄酮工艺[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(22): 56-60.
ZHANG Yang, LIU Chuang. Supercritical extraction of flavonoids from mung bean hull by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2017, 38(22): 56-60.

[12] 杜冠尚, 罗磊, 张向辉, 等. 绿豆皮牡荆素提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 农产品加工, 2020(17): 38-43.
DU Guanshang, LUO Lei, ZHANG Xianghui, et al. Optimization of extraction technology of mung bean hull vitexin and its antioxidant activity[J]. Farm Products Processing, 2020(17): 38-43.

[13] 康维良. 绿豆皮黄酮提取纯化及不同储藏条件下黄酮的特性变化[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
KANG Weiliang. Extraction and purification of flavonoids from mung bean hull and changes of flavinoid characteristics under different storage conditions[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.

[14] 李侠, 邹基豪, 王大为. 响应面试验优化超声波-酶法提取绿豆皮黄酮类化合物工艺[J]. 食品科学, 2017, 38(8): 206-212.
LI Xia, ZOU Jihao, WANG Dawei. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of flavonoids from mung bean hull[J]. Food Science, 2017, 38(8): 206-212.

[15] 段腾飞, 夏秋霞, 高贵珍, 等. 真空耦合超声波提取绿豆衣中黄酮工艺研究[J]. 阴山学刊(自然科学版), 2018, 32(4): 36-40.
DUAN Tengfei, XIA Qiuxia, GAO Guizhen, et al. Study on the extraction of flavonoids from mung bean hull by ultrasound-vacuum assisted[J]. Yinshan Academic Journal(Natural Science Edition), 2018, 32(4): 36-40.

[16] ZHOU Y, ZHENG J, GAN R Y, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of antioxidants from the mung bean coat[J]. Molecules, 2017, 22(4): 638.

[17] 张昕. 绿豆皮清凉饮料的研制[J]. 吉林工商学院学报, 2011, 27(5): 79-83.
ZHANG Xin. Development of Mung Bean Skin Cool Beverages[J]. Journal of Jilin Industrial and Commercial University, 2011, 27(5): 79-83.

[18] 周俊鹏, 陆鹏飞, 倪新雨, 等. 绿豆皮黄酮的纯化工艺研究[J]. 农产品加工, 2018(12): 27-31.
ZHOU Junpeng, LU Pengfei, NI Xinyu, et al. Study on purification of flavones from mung tegument[J]. Farm Products Processing, 2018(12): 27-31.

[19] 康维良, 张东杰, 翟爱华, 等. 绿豆皮中黄酮树脂纯化条件优化及纯化物分析[J]. 农产品加工, 2020(12): 60-65, 69.
KANG Weiliang, ZHANG Dongjie, ZHAI Aihua, et al. Optimization of purification condition and purification material analysis of flavone resin in mung bean hull[J]. Farm Products Processing, 2020(12): 60-65, 69.

[20] 罗磊, 姬青华, 马丽苹, 等. NKA-9 大孔树脂对绿豆皮黄酮的纯化研究[J]. 中国食品学报, 2019, 19(6): 157-167.
LUO Lei, JI Qinghua, MA Liping, et al. Studies on purification of total flavonoids from mung bean hull using NKA-9 macroporous resin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(6): 157-167.

[21] 李侠, 臧学丽, 徐祎博, 等. AB-8 大孔树脂纯化绿豆皮黄酮工艺优化及纯化前后抗氧化能力比较[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 283-290.
LI Xia, ZANG Xueli, XU Yibo, et al. Optimization of purification of flavonoids from mung bean hull by AB-8 macroporous resin and comparison of antioxidant capacity of crude and purified flavonoids[J]. Food Science, 2018, 39(10): 283-290.

[22] LAI F R, WEN Q B, LI L, et al. Antioxidant activities of water-soluble polysaccharide extracted from mung bean (*Vigna radiata* L.) hull with ultrasonic assisted treatment[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(2): 323-329.

[23] ZHONG K, LIN W J, WANG Q, et al. Extraction and radicals scavenging activity of polysaccharides with microwave extraction from mung bean hulls[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 51(4): 612-617.

[24] 安启源, 刘璇, 马金龙. 绿豆各组分中多糖含量的比较[J]. 现代园艺, 2017(19): 14.
AN Qiyuan, LIU Xuan, MA Jinlong. Comparison of polysaccharide content in different components of mung bean[J]. Xiandai Horticulture, 2017(19): 14.

[25] 闵甜, 吴晖, 赖富饶, 等. 超声辅助提取绿豆皮水溶性多糖工艺优化[J]. 食品科学, 2012, 33(14): 6-10.
MIN Tian, WU Hui, LAI Furao, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction process for water-soluble polysaccharide from mung bean hull[J]. Food Science, 2012, 33(14): 6-10.

[26] 黄静文, 程玉来. 绿豆皮多糖提取工艺的比较[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 212-216.
HUANG Jingwen, CHENG Yulai. Comparaison on extraction of

polysaccharides from mung bean hull[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(5): 212–216.

[27] 段腾飞, 郭志华, 夏秋霞, 等. 真空耦合超声波提取绿豆衣中多糖工艺[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2018, 36(5): 758–761.
DUAN Tengfei, GUO Zhihua, XIA Qiuxia, et al. Study on the extraction of polysaccharide from mung bean hull by ultrasound–vacuum assisted[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2018, 36(5): 758–761.

[28] 李积华, 郑为完, 杨静, 等. 绿豆膳食纤维的分析[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(7): 176–178.
LI Jihua, ZHENG Weiwan, YANG Jing, et al. Analysis of dietary fiber in mung bean[J]. Food Research and Development, 2006, 27(7): 176–178.

[29] 杨末. 绿豆皮可溶性膳食纤维的提取及其降血脂研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
YANG Mo. The study on the extraction technology of soluble dietary fiber from mung bean Coats and its lowering blood lipid[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.

[30] 王倩, 马丽苹, 焦昆鹏, 等. 绿豆皮不溶性膳食纤维提取及其性质研究[J]. 农产品加工, 2015(14): 12–15.
WANG Qian, MA Liping, JIAO Kunpeng, et al. Optimization extraction of insoluble dietary fiber from *Phaseolus radiatus* hull and its properties[J]. Farm Products Processing, 2015(14): 12–15.

[31] LIU Q Q. Optimization of extraction technology for insoluble dietary fiber from seed–coat of mung bean by response surface methodology [J]. Medicinal Plant, 2016, 7(Z3): 48–52.

[32] 刘倩倩. 响应面优化绿豆皮不溶性膳食纤维超声辅助提取工艺[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 203–207.
LIU Qianqian. Optimization of ultrasonic–assisted extraction technology for insoluble dietary fiber from mung bean skin by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 203–207.

[33] 王亚静, 陈珊珊, 隋思瑶, 等. 绿豆皮纤维素的超声波–微波联合辅助提取及其性质研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(9): 119–125.
WANG Yajing, CHEN Shanshan, SUI Siyao, et al. Study on cellulose extraction from mung bean hull by the ultrasonic microwave–assisted alkaline extraction and its properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(9): 119–125.

[34] 罗磊, 王雅琪, 马丽苹, 等. 绿豆皮可溶性膳食纤维提取工艺优化及其物理特性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 144–149.
LUO Lei, WANG Yaqi, MA Liping, et al. Study and optimization on extraction process and physical characteristics of soluble dietary fiber from *Phaseolus radiatus* Hull[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 144–149.

[35] 王大为, 赵鑫, 董欣, 等. 发芽对绿豆皮膳食纤维结构及性质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 111–117.
WANG Dawei, ZHAO Xin, DONG Xin, et al. Effect of germination on the structure and properties of dietary fiber in mung bean skin[J]. Food Science, 2016, 37(23): 111–117.

[36] 周爱丽. 绿豆皮膳食纤维挤出改性工艺优化及其表征[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 109–113.
ZHOU Aili. Optimization of extrusion modification process for mung bean hull dietary and its characterization[J]. Food Research and Development, 2016, 37(23): 109–113.

[37] 杜冰, 黄守耀, 姜龙波, 等. 双螺杆挤压对绿豆皮中膳食纤维的改性研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(10): 170–173, 176.
DU Bing, HUANG Shouyao, JIANG Longbo, et al. Study on modified dietary fiber of mung bean hull by twin–screw extrusion[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(10): 170–173, 176.

[38] TAJODDIN M, SHINDE M, LALITHA J. Polyphenols of mung bean (*Phaseolus aureus* L.) cultivars differing in seed coat color: effect of dehulling[J]. Journal of New Seeds, 2010, 11(4): 369–379.

[39] 廉雪, 张泽燕, 张耀文. 绿豆籽粒颜色的遗传分析[J]. 山西农业科学, 2020, 48(3): 324–326.
LIAN Xue, ZHANG Zeyan, ZHANG Yaowen. Genetic analysis of mung bean hull color[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(3): 324–326.

[40] 花丹, 张晖, 钱海峰, 等. 绿豆色素的降解和颜色损失的研究[J]. 食品科技, 2014, 39(1): 263–267.
HUA Dan, ZHANG Hui, QIAN Haifeng, et al. Chlorophyll degradation and color loss in mung bean[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(1): 263–267.

[41] YAO Y, CHENG X Z, REN G X. Contents of D–chiro–inositol, vitexin, and isovitexin in various varieties of mung bean and its products[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(11): 1710–1715.

[42] 廉雪, 张耀文. 不同种皮色绿豆黄酮类含量的初步研究[J]. 山西农业科学, 2020, 48(1): 55–57, 113.
LIAN Xue, ZHANG Yaowen. Preliminary study on flavonoids content of mung bean in different seed coat color[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(1): 55–57, 113.

[43] 王传虎, 周丽, 吴福勇, 等. 超临界 CO_2 萃取废弃绿豆种皮中的绿色素[J]. 食品工业科技, 2010, 31(5): 248–251.
WANG Chuanhu, ZHOU Li, WU Fuyong, et al. Extraction of green pigment from mung bean hull by supercritical CO_2[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(5): 248–251.

[44] 于畅. 超声波辅助提取绿豆皮中色素和膳食纤维的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012.
YU Chang. The ultrasonic assist on extraction technology of dietary fiber and pigment from mung bean skin[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012.

[45] 王传虎, 杨周生, 秦英月, 等. 微波–超声协同提取废弃绿豆种皮中的绿色素[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(1): 112–116.
WANG Chuanhu, YANG Zhousheng, QIN Yingyue, et al. Extraction of green pigment in mung bean hull with microwave–ultrasonic radiation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(1): 112–116.

[46] 陈然, 赵建京, 范志红. 煮制条件对绿豆清汤颜色及抗氧化性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 115–120.

CHEN Ran, ZHAO Jianjing, FAN Zhihong. Color and antioxidant activity of mung bean clear soup as affected by boiling conditions[J]. Food Science, 2012, 33(8): 115–120.

[47] HOU D Z, ZHAO Q Y, YOUSAF L, et al. Beneficial effects of mung bean hull on the prevention of high–fat diet–induced obesity and the modulation of gut microbiota in mice[J]. European Journal of Nutrition, 2020: 1–17.

[48] HASHIGUCHI A, HITACHI K, ZHU W, et al. Mung bean (*Vigna radiata* (L.)) hull extract modulates macrophage functions to enhance antigen presentation: a proteomic study[J]. Journal of Proteomics, 2017, 161: 26–37.

[49] ZHU S, LI W, LI J H, et al. It is not just folklore: the aqueous extract of mung bean hull is protective against *Sepsis*[J]. Evidence Based Complementary and Alternative Medicine, 2012, 2012: 498467.

[50] JANG Y H, KANG M J, CHOE E O, et al. Mung bean hull ameliorates hyperglycemia and the antioxidant status in type 2 diabetic db/db mice[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(1): 247–252.

[51] HOU D Z, ZHAO Q Y, YOUSAF L, et al. A comparison between whole mung bean and decorticated mung bean: beneficial effects on the regulation of serum glucose and lipid disorders and the gut microbiota in high–fat diet and streptozotocin–induced prediabetic mice[J]. Food & Function, 2020, 11(6): 5525–5537.

[52] XU W D, LI J Y, QI W P, et al. Hypoglycemic effect of vitexin in C57BL/6J mice and HepG2 models[J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021: 1–7.

[53] GAO Y F, ZHANG M N, WANG T X, et al. Hypoglycemic effect of D–chiro–inositol in type 2 diabetes mellitus rats through the PI3K/Akt signaling pathway[J]. Molecular and Cellular Endocrinology, 2016, 433: 26–34.

[54] HASHIGUCHI A, OKABAYASHI K, YAMAGUCHI H, et al. The effect of mung bean (*Vigna radiata* (L.)) hull extract on mouse liver metabolism during progesterone withdrawal[J]. Journal of Medicinal Food, 2020, 23(9): 967–977.

[55] 王雅琪. 绿豆皮可溶性膳食纤维的制备及其性质研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
WANG Yaqi. Study on preparation and properties of soluble dietary fiber from *Phaseolus radiatus* hull[D]. Luoyang, China: Henan University of Science and Technology, 2017.

[56] 胡梁斌, 赵旭娜, 王淼焱, 等. 绿豆汤中水溶性色素的抗氧化活性与抗癌活性研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(2): 104–106.
HU Liangbin, ZHAO Xuna, WANG Miaoyan, et al. Study on antioxidant and anticancer activities of water–soluble pigment from mung bean[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(2): 104–106.

[57] KANATT S R, K A, SHARMA A. Antioxidant and antimicrobial activity of legume hulls[J]. Food Research International, 2011, 44(10): 3182–3187.

[58] 罗磊, 王雅琪, 马丽苹, 等. 绿豆皮可溶性膳食纤维的抗氧化作用[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 182–187.
LUO Lei, WANG Yaqi, MA Liping, et al. Antioxidant effect of soluble dietary fiber from mung bean(*Phaseolus* radiates L.) hull[J]. Food Science, 2018, 39(3): 182–187.

[59] 罗磊, 姬青华, 马丽苹, 等. 绿豆皮黄酮对 H2O2 诱导人脐静脉血管内皮细胞损伤的保护作用[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 35–41.
LUO Lei, JI Qinghua, MA Liping, et al. Protective effects of flavonoids from mung bean hull on human umbilical vein endothelial cells induced by hydrogen peroxide[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(2): 35–41.

[60] CAO D D, LI H, YI J Y, et al. Antioxidant properties of the mung bean flavonoids on alleviating heat stress[J]. PLoS One, 2011, 6(6): e21071.

[61] 陶明芳, 李蓉, E.ELKHEDIR. A, 等. 发芽绿豆皮主要活性成分异牡荆素对秀丽隐杆线虫的延寿作用[C]//中国食品科学技术学会第十六届年会暨第十届中美食品业高层论坛论文摘要集, 武汉: 中国食品科学技术学会, 2019: 160–161.
TAO Mingfang, LI Rong, ELKHEDIR A E, et al. Isovitexin, the main active ingredient of germinated mung bean peel, can prolong the life of Caenorhabditis elegans[C]//Proceedings of the 16th Annual Meeting of the Chinese Institute of Food Science and Technology and the 10th Sino–US Food Industry Forum, Wuhan: Chinese Institute of food Science and Technology, 2019: 160–161.

[62] MUSHTAQ Z, IMRAN M, SALIM–UR–REHMAN, et al. Biochemical perspectives of xylitol extracted from indigenous agricultural by–product mung bean (*Vigna radiata*) hulls in a rat model[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(5): 969–974.

[63] SHARMA R, GHOSHAL G. Characterization and cytotoxic activity of pigment extracted from *Rhodotorula mucilaginosa* to assess its potential as bio–functional additive in confectionary products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020: 1–11.

[64] NO J, SHIN M. Textural properties of mung bean starch gels prepared from whole seeds[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(3): 729–734.

[65] NO J, LEE K A, SHIN M. Anti–oxidant activities of mung bean starch and starch gels prepared from whole and hulled seeds[J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(2): 453–456.

[66] 李可心, 付荣荣, 王冰倩, 等. 绿豆皮低糖戚风蛋糕的研制[J]. 食品工业, 2019, 40(12): 144–147.
LI Kexin, FU Rongrong, WANG Bingqian, et al. Development of mung bean skin low sugar hurricane cake[J]. The Food Industry, 2019, 40(12): 144–147.

[67] 邹国文, 王洁, 贾晓昱, 等. 膳食纤维杂粮面包的研制[J]. 中国果菜, 2019, 39(8): 1–6.
ZOU Guowen, WANG Jie, JIA Xiaoyu, et al. Preparation of high dietary fiber multigrain bread[J]. China Fruit & Vegetable, 2019, 39(8): 1–6.

[68] 王晓英. 金银花、绿豆皮纤维保键饮料的研制[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(10): 65–68.
WANG Xiaoying. Study on health beverage of honeysuckle and

mung bean hull fiber[J]. Food Research and Development, 2013, 34 (10): 65–68.

[69] 王晓英. 蒲公英、绿豆皮保健饮料的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(10): 85–88.
WANG Xiaoying. Development of a healthy beverage made from *Taraxacum mongolicum* and mung bean hull[J]. Food Research and Development, 2012, 33(10): 85–88.

[70] 马永哲, 罗磊, 曹伟民, 等. 保健型绿豆皮酸奶的制备及其抗氧化活性的研究[J]. 食品工业, 2017, 38(7): 102–106.
MA Yongzhe, LUO Lei, CAO Weimin, et al. Study on preparation of healthy mung bean yoghurt and its antioxidant activity[J]. The Food Industry, 2017, 38(7): 102–106.

[71] 林亚楠. 膳食纤维纳米乳覆膜鱼松的研制及货架期研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2019.
LIN Yanan. Development and shelf life study of nanoemulsion coated fish floss with dietary fiber[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.

[72] 马中苏, 王亚静, 陈珊珊, 等. 绿豆皮纳米纤维素对浓缩乳清蛋白可食膜性能的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(5): 40–45.
MA Zhongsu, WANG Yajing, CHEN Shanshan, et al. Effects of mung bean hull nanocrystalline cellulose on the performance of whey protein concentrate edible film[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(5): 40–45.

[73] SONG M Y, ZHOU Y H, REN X, et al. Biowaste–based porous carbon for supercapacitor: The influence of preparation processes on structure and performance[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 535: 276–286.

[74] YUAN J H, XU R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(1): 110–115.

加工编辑:姚骏
收稿日期:2021–04–29