

基于主成分分析不同加工方式鲜食小麦 蛋白功能特性及亚基结构

温青玉¹, 张康逸¹, 杨淑祯², 祝俊国², 王宇飞³, 李天义⁴

(1. 河南省农业科学院农副产品加工研究中心, 河南省全谷物小麦制品加工国际联合实验室, 河南省全谷物鲜食加工工程技术研究中心, 河南郑州 450002) (2. 河南省安康食品科技研究院, 河南郑州 450006)

(3. 中北大学化学工程与技术学院, 山西太原 038507) (4. 淮阳县金农实业有限公司, 河南淮阳 466700)

摘要: 本实验以炒制和煮制两种热处理后的鲜食小麦为原料, 通过碱提酸沉法提取蛋白, 并对其结构和功能特性进行测定, 同时借助于主成分分析法对不同加工方式鲜食小麦蛋白的功能特性进行综合评价。结果表明: 煮制的鲜食小麦蛋白中的分子量为 21.20 ku 的条带逐渐消失, 而炒制中的此条带则逐渐显现; 两种处理的鲜食小麦蛋白的持水性随热处理时间的增加均不断提高, 而持油性、起泡性、乳化性、溶解性则呈先上升后下降的趋势, 最大值分别为 4.23 g/g、4.30 m²/g、44.67%和 30.31%, 乳化稳定性则与之相反。根据主成分分析结果进行综合评价, 煮制和炒制综合得分最高分别为 29.43%、14.08%, 得出煮制的功能特性优于炒制, 且煮制 15 min 时鲜食小麦蛋白的功能特性最好。综上所述, 煮制的鲜食小麦蛋白功能特性较炒制的好, 适合对鲜食小麦进行加工, 为鲜食小麦原料热加工提供一定的理论依据。

关键词: 鲜食小麦蛋白; 不同加工方式; 亚基; 功能特性; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2021)07-90-100

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.1103

Functional Characteristics and Subunit Structure of Fresh Wheat Protein with Different Processing Methods Based on Principal Component Analysis

WEN Qing-yu¹, ZHANG Kang-yi¹, YANG Shu-zhen², ZHU Jun-guo², WANG Yu-fei³, LI Tian-yi⁴

(1.Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Henan Province International Joint Laboratory for Whole Grain Wheat Processing, Province Whole Grain Fresh Food Processing Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450002, China) (2.Henan Ankang Food Science and Technology Research Institute, Zhengzhou 450006, China) (3.School of Chemical Engineering and Technology, North Central University, Taiyuan 038507, China)(4.Huaiyang County Jinnong Industrial Co. Ltd., Huaiyang 466700, China)

Abstract: Two kinds of heat-treated fresh wheat were used as raw materials, the proteins were extracted by alkaline extraction and acid precipitation in this paper, and their structure and functional properties were determined. At the same time, the functional characteristics of fresh wheat protein with different processing methods were comprehensively evaluated by mean of principal component analysis. The results showed

引文格式:

温青玉,张康逸,杨淑祯,等.基于主成分分析不同加工方式鲜食小麦蛋白功能特性及亚基结构[J].现代食品科技,2021,37(7):90-100

WEN Qing-yu, ZHANG Kang-yi, YANG Shu-zhen, et al. Functional characteristics and subunit structure of fresh wheat protein with different processing methods based on principal component analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 90-100

收稿日期: 2020-11-29

基金项目: 河南省重大科技专项 (151100111300); 河南省农业科学院杰出青年科技基金 (2020JQ04); 河南省农业科学院科技创新创意项目 (豫财科【2020】36号 2060302); 河南省重大公益专项 (201300110300); 2020年度县(市)创新引导计划项目 (豫科【2020】39号); “科创中原”科技经济融合行动项目 (豫科协发【2020】68号); 河南省农业科学院基本科研业务费 (2021ZC68)

作者简介: 温青玉 (1987-), 女, 助理研究员, 研究方向: 农副产品加工

通讯作者: 张康逸 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农副产品加工

that the subunit band with a molecular weight of 21.2 ku gradually disappeared in the cooked fresh wheat protein, while the same subunit band gradually appeared in the fried fresh wheat protein; the water holding capacity of the two kinds of heat-treated fresh wheat protein continuously increased with the extension of heat treatment time, whereas the changes of oil retention, emulsification, foaming, and solubility for the two kinds of heat-treated fresh wheat protein showed a trend of first increasing and then decreasing, the corresponding maximum values were 4.23 g/g, 4.30 m²/g, 44.67%, and 30.31%, respectively; the changes of emulsion stability showed opposite trend. According to the results of the principal component analysis of functional characteristics, the highest comprehensive scores of cooked and fried fresh wheat protein were 29.43% and 14.08%, respectively. It was concluded that the functional characteristics of cooked fresh wheat protein were better than those of fried fresh wheat protein. Moreover, the functional characteristics of fresh wheat protein were best at cooked time of 15 min. In a word, the functional properties of cooked fresh wheat protein were better than those of fried fresh wheat protein, which was suitable for the processing of fresh wheat. Furthermore, a certain theoretical basis was provided for the thermal processing of fresh wheat raw materials.

Key words: fresh wheat protein; different processing methods; subunits; functional properties; principal component analysis

鲜食小麦是色泽碧绿、颗粒饱满、处于乳熟期的小麦粒^[1]。由于其色泽诱人、口感独特、营养价值较高等特点,逐渐成为一种深受大家喜爱的全谷物健康食品^[2]。鲜食小麦蛋白含量丰富,其营养价值明显优于大多数植物蛋白质,是优质价廉的天然蛋白^[3]。由于其蛋白质含量高,氨基酸种类丰富,可将其制作成青麦酱^[4]、捻转^[5]、青麦糕^[6]、鲜食小麦粽子^[7]、小炒鲜食小麦,蛋黄火焗鲜食小麦等美味佳肴^[8],口感清甜,老少皆宜,且其经济价值和市场前景备受各界的关注,具有良好的发展前景^[9,10]。生活中鲜食小麦的加工多采用湿热法和干热法,常见的即为煮制和炒制。与未加工的鲜食小麦相比,热处理后的鲜食小麦食用范围更广。在食品加工过程中,热处理引起的蛋白质的变化会对食品的品质包括风味以及感官特性方面形成有利的影响^[11]。主成分分析法作为一种基于降维思想的多元统计方法,近年来为食品品质的综合评价提供便利,因其在减少评价指标的前提下能够提取出主要影响指标而被广泛应用^[12]。因此,通过探讨煮制和炒制湿热处理加工方式对鲜食小麦蛋白功能特性及结构的影响,并运用主成分分析法分别对其功能特性进行综合评价,从而找到鲜食小麦的最适加工方式,使其在食品加工过程中保持良好的风味和功能特性的研究具有参考意义。

相关研究表明对鲜食小麦进行适当的热处理,会使鲜食小麦蛋白的持水性,乳化性,溶解性等特性发生改变,最终影响产品的品质与营养^[5]。李杰等^[13]研究表明高温、高压、高剪切力会使粮油中的蛋白结构产生组织化,从而改善食品的口感。Wittayachai等^[14]研究表明热加工可能会通过降低可溶性蛋白分子间作用力使蛋白凝胶能力丧失,进而使蛋白的起泡性和泡沫稳定性升高。Chandrasiri等^[15]发现热处理会使蛋白质发生氧化,引起蛋白质的理化性质以及功能特性发生改变。目前,未发现不同湿热处理加工方式对

鲜食小麦蛋白功能性质及结构影响方面的研究。

基于以上原因,本实验以炒制和煮制两种湿热处理后的鲜食小麦为原料,通过碱提酸沉法提取蛋白,并对鲜食小麦蛋白的结构和功能特性进行测定,同时运用主成分分析法对不同加工方式鲜食小麦蛋白的功能特性进行综合评价,找到鲜食小麦的最适加工方式,以期对鲜食小麦蛋白的原料热加工和改性研究提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜食小麦(糯麦2号),河南省农科院农副产品加工研究所提供;石油醚(30~60℃)、浓盐酸(盐酸浓度36%~38%)、磷酸二氢钾、浓硫酸、甲醇、无水乙醇、无水亚硫酸钠、氯仿、硼酸、氢氧化钠、消化片、氯化钠、十二烷基硫酸钠等,所用试剂均为分析纯。

DHG-9240A 鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;JW1042 低速离心机,安徽嘉文仪器装备有限公司;K110 全自动凯氏定氮仪,山东海能科学仪器有限公司;DYCZ-24DN 电泳仪、DYY-6C 型电泳仪电源、WD-9413B 型凝胶成像分析系统,北京六一生物科技有限公司;SK-R330-Pro 数显型翘板摇床,北京大龙兴创实验仪器有限公司;800Y 多功能粉碎机,永康市铂欧五金制品有限公司;FJ-200 高速分散均质机,上海嫩谷机电设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理

从冰箱(-40℃)里取出冷冻后的鲜食小麦,对其进行清洗,解冻,洗去鲜食小麦表面的杂质及灰尘,待除去表面残留的水分后对其进行炒制和煮制处理。

1.2.2 炒制鲜食小麦

称取 350 g 左右的鲜食小麦, 分别对鲜食小麦进行 0 min、5 min、10 min、15 min、20 min 不同时间的炒制(功率均为 1300 W)处理。将炒过的鲜食小麦冷却至室温后, 置于鼓风干燥箱里(55 °C)烘干至恒重, 置于干燥处备用。

1.2.3 煮制鲜食小麦

参照张舒等^[16]的方法并略加改动。称取 500 g 左右的鲜食小麦, 分别对其进行 0 min、5 min、10 min、15 min、20 min 不同时间的煮制(功率均为 1300 W)处理。将煮好的鲜食小麦冷却至室温后放进鼓风干燥箱(55 °C)烘干至恒重, 收集放置干燥处备用。

1.2.4 粉碎

把鲜食小麦放到粉碎机里依次进行粉碎, 粉碎彻底后过 60 目筛, 将过筛后的鲜食小麦粉置于干燥处, 以备后续脱脂处理。

1.2.5 脱脂

参考 MacRitchie 等^[17]的方法, 对过筛后的鲜食小麦进行脱脂处理。

1.2.6 鲜食小麦蛋白的提取

参考温青玉等^[2]的方法, 对脱脂后的鲜食小麦提取蛋白质。

1.2.7 持水性、持油性的测定

参考 Hashimoto^[18]和孙媛^[19]的测定方法。称取 0.2 g 鲜食小麦蛋白, 加入 20 mL 的蒸馏水(大豆油), 充分混匀、震荡, 静置 20 min 后于 4000 r/min 下离心 15 min, 倒掉上层未吸附的水(大豆油)后进行称重, 计算每克鲜食小麦蛋白样品的持水性(持油性), 计算公式如公式(1)所示。

$$\text{持水性(持油性)} = \frac{w_2 - w_1}{w_0} \quad (1)$$

式中: w_0 表示鲜食小麦蛋白样品的质量, g; w_1 表示离心管加鲜食小麦蛋白样品的总质量, g; w_2 表示离心管加离心后沉淀的总质量, g。

1.2.8 乳化性、乳化稳定性的测定

参照 Yin^[20]的方法, 用去蒸馏水配制 10 g/L 的蛋白溶液, 振荡 30 min 使其充分溶解, 3000 r/min 下离心 10 min, 取上清液 15 mL, 再加入 5 mL 玉米油在高速分散均质机中以 10000 r/min 均质 1 min, 制备得到乳状液后, 分别于 0 min 和 10 min 时从乳液底部吸取 5 μ L 样品加入到 5 mL 0.1% SDS 溶液中, 混合均匀后在 500 nm 的波长处分别测定吸光度 A_0 和 A_{10} , 以 0.10% SDS 做空白。按公式(2)和公式(3)分别计算乳化活性指数(Emulsifying Activity Index, EAI)和乳化稳定性指数(Emulsifying Stability Index, ESI)。

$$EAI / (m^2 / g) = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{10000 \times \theta \times L \times C} \quad (2)$$

$$ESI / (\text{min}) = \frac{A_0 \times 10}{A_0 - A_{10}} \quad (3)$$

式中: EAI 表示乳化活性指数; ESI 表示乳化稳定性指数; A_0 表示在 0 min 时的吸光度值; A_{10} 表示在 10 min 时的吸光度值; N 表示稀释倍数, 100; θ 表示油相体积, 0.25; L 表示比色皿厚度, 1 cm; C 表示蛋白质浓度, mol/L。

1.2.9 起泡性、起泡稳定性的测定

参照杨锋等人^[21]的方法, 用去蒸馏水配制 10 g/L 的蛋白溶液, 振荡 30 min 使其充分溶解, 3000 r/min 下离心 10 min, 取上清液 30 mL (V_0 , mL) 置于高速分散均质机中以 10000 r/min 均质 1 min 后, 记录泡沫体积 (V_1 , mL), 待静置 20 min 后, 再记录泡沫体积 (V_{20} , mL)。按公式(4)和公式(5)分别计算起泡能力(Foaming Capacity, FC)和泡沫稳定性(Foaming Stability, FS)。

$$FC / \% = \frac{V_1}{V_0} \times 100\% \quad (4)$$

$$FS / \% = \frac{V_{20}}{V_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中: FC 表示起泡能力, %; FS 表示泡沫稳定性, %; V_0 表示上清液体积, mL; V_1 表示均值 1 min 后的泡沫体积, mL; V_{20} 表示静置 20 min 后的泡沫体积, mL。

1.2.10 溶解性的测定

参考朴金苗等^[22]的测定方法, 取 0.5 g 鲜食小麦蛋白置于 50 mL 蒸馏水中溶解, 室温振荡 1 h 后于 4000 r/min 离心 20 min, 测定上清液中的氮含量。溶解度计算如公式(6)所示。

$$\text{溶解度} / \% = \frac{\text{上清液中氮含量}}{\text{蛋白样品中总氮含量}} \times 100\% \quad (6)$$

1.2.11 SDS-PAGE 电泳测定

采用 12% 分离胶、5% 浓缩胶对鲜食小麦蛋白进行 SDS-PAGE 电泳分析。称取 1 mg 样品于 25 μ L 4 倍上样缓冲液中, 漩涡振荡后离心, 取上清液, 将其在沸水中煮制 8 min 使蛋白质发生热变性; 恒定电流 10 mA, 电泳时间约 40 min。进入分离胶后, 将恒定电流调至 20 mA, 电泳约 80 min, 待溴酚蓝距凝胶边缘大约 5 mm 时, 停止电泳; 染色液染色 1 h 后, 脱色液进行脱色, 多次更换脱色液, 直至蛋白条带清晰, 最后用凝胶成像系统进行电泳图谱拍摄。

1.2.12 数据统计分析

每个处理均进行 3 次平行实验, 且所得数据均为 3 次平行实验的平均值, 实验数据分别采用 SPSS 16.0、Origin 8.0 和 MATLAB R2014a 进行统计分析与绘图分

析。其中,显著性比较采用单因素方差分析,当 $p<0.05$ 时表示数据间具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 持水性和持油性的比较分析

蛋白质的持水性和持油性^[23]在蛋白食品的加工过程中起着非常重要的作用,且与食品贮藏过程中的“保鲜”及“成型”有密切的联系。

在炒制和煮制两种热处理加工方式下鲜食小麦蛋白持水性的变化如图1所示。由图1可知,未加工的鲜食小麦蛋白的持水性为1.57 g/g,炒制的鲜食小麦蛋白的持水性在10 min内增加至最高2.38 g/g,煮制的鲜食小麦蛋白的持水性在20 min内增加至3.84 g/g,这与周小理等^[24]研究的湿热处理对苦荞蛋白的持水性的影响基本一致。随着热处理时间的延长,炒制处理的鲜食小麦蛋白的持水性先增大后略微减小至2.25 g/g,而煮制处理的鲜食小麦蛋白的持水性则呈逐渐增大趋势。随着热处理时间的延长,两种热处理的鲜食小麦蛋白的持水性差异逐渐显著,在20 min时达到差异极显著水平($p<0.01$),此时煮制的持水性达3.84 g/g,而炒制的持水性达到2.24 g/g。综上所述,煮制鲜食小麦蛋白的持水性要高于炒制鲜食小麦蛋白。原因可能是鲜食小麦在煮制过程中吸收水分,促使蛋白质分子与水分子相互作用,增加了疏水基团的暴露^[25];而鲜食小麦在炒制过程中水分供应不足,减少了疏水基团的暴露,导致其持水性较煮制鲜食小麦蛋白低。因此,随着热处理时间的延长,两种热处理的持水性差距逐渐显著。

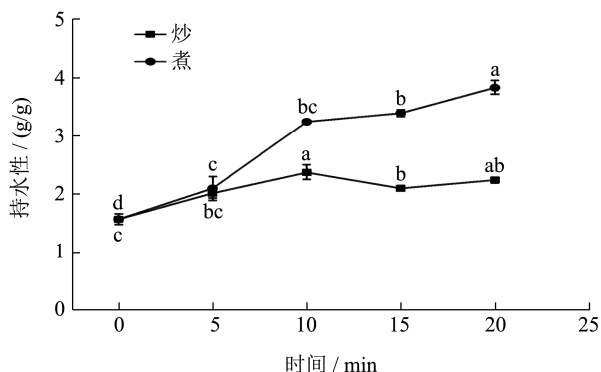


图1 不同加工方式下鲜食小麦蛋白持水性的变化

Fig.1 The changes of water holding capacity of fresh wheat protein using different processing methods

注:同组数据小写字母不同表示差异性显著, $p<0.05$,下同。

在炒制和煮制两种热处理加工方式下鲜食小麦蛋白持油性的变化如图2所示。由图2可知,未加工的

鲜食小麦蛋白的持油性为3.89 g/g,煮制的和炒制的鲜食小麦蛋白的持油性在15 min时均增长至最高4.34 g/g。随加工时间的延长,炒制处理的鲜食小麦蛋白的持油性呈先降低后上升再降低的趋势,持油性3.89 g/g先降低至2.00 g/g,后上升至最高4.34 g/g,在20 min时持油性降低至3.93 g/g,而煮制处理的鲜食小麦蛋白的持油性呈先上升后降低的趋势,煮制10 min的鲜食小麦蛋白持油性要显著高于炒制鲜食小麦蛋白($p<0.05$),在煮制5 min时差距最为显著($p<0.01$),持油性分别为2.00 g/g,3.98 g/g,但煮制20 min的鲜食小麦蛋白持油性2.91 g/g要显著低于炒制持油性3.93 g/g。随着加工时间的延长,蛋白质内部空间结构被破坏,促使肽链展开^[26],使油在蛋白质中能够均匀分布,同时,也促进了蛋白质和油分子之间的相互作用^[27,28]。两种热处理加工方式相比,煮制鲜食小麦蛋白的持油性要高于炒制鲜食小麦蛋白。原因可能是煮制后的鲜食小麦蛋白中的极性基团更易于与油分子结合,而炒制的鲜食小麦蛋白较难与油分子结合。基于这些特性,可将其应用于油条,油饼等油炸食品,以及烘焙制品中。

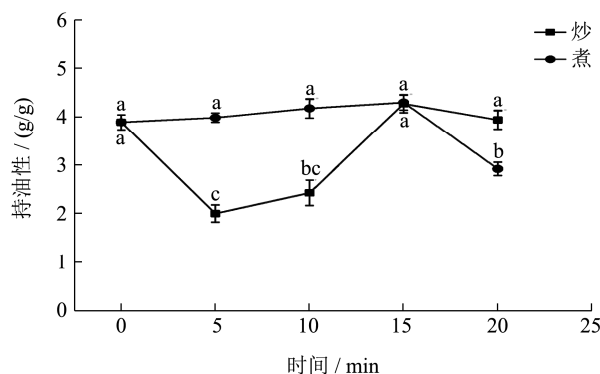


图2 不同加工方式下鲜食小麦蛋白持油性的变化

Fig.2 The changes of oil retention of fresh wheat protein using different processing methods

2.2 乳化性、乳化稳定性的比较分析

蛋白质的乳化性和乳化稳定性^[29]在食品的加工过程中也具有十分重要的作用,良好的乳化性决定良好的口感,但其易受蛋白的分子量,表面疏水性和空间阻碍的影响^[30]。

在炒制和煮制两种加工方式下鲜食小麦蛋白乳化性和乳化稳定性的变化分别如图3和图4所示。由图3可知,未加工的鲜食小麦蛋白的乳化性为1.35 m²/g,而炒制的鲜食小麦蛋白的持水性在15 min内增加至最高4.30 m²/g,煮制的鲜食小麦蛋白的乳化性在15 min内增加至4.05 m²/g,这与周小理等^[24]研究的湿热处理对苦荞蛋白乳化性的影响结果较为一致。随着加

工时间的延长, 炒制和煮制处理的鲜食小麦蛋白的乳化性均呈先上升后下降的趋势。两种热处理加工的鲜食小麦蛋白在开始时乳化性相差并不显著, 但在 10 min 时两种热处理加工的鲜食小麦蛋白乳化性差异极显著 ($p<0.01$), 此时煮制和炒制的乳化性分别为 2.15 m^2/g , 4.05 m^2/g 。由图 3 及乳化性变化幅度可知, 炒制鲜食小麦蛋白的乳化性要高于煮制鲜食小麦蛋白。

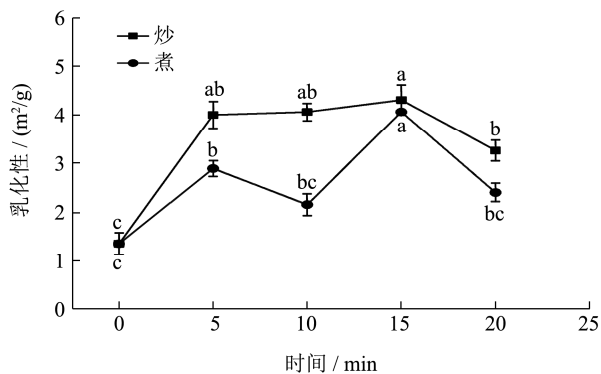


图 3 不同加工方式下鲜食小麦蛋白乳化性的变化

Fig.3 The changes of emulsification of fresh wheat protein using different processing methods

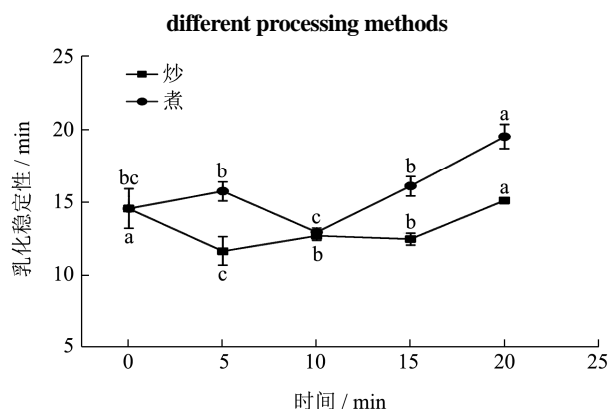


图 4 不同加工方式下鲜食小麦蛋白乳化稳定性的变化

Fig.4 The changes of emulsification stability of fresh wheat protein under different processing methods

由图 4 可知, 未加工的鲜食小麦蛋白的乳化稳定性为 14.56 min, 炒制和煮制的鲜食小麦蛋白的乳化稳定性在处理 20 min 内分别增加至 15.11 min、19.52 min。随着加工时间的延长, 炒制处理的鲜食小麦蛋白的乳化稳定性呈先下降后升高的趋势, 乳化稳定性 14.56 min 先降低至 11.62 min, 后上升至最高 15.11 min, 煮制处理的鲜食小麦蛋白的乳化稳定性呈先上升后降低再上升的趋势, 乳化稳定性 14.56 min 先升高至 15.75 min, 后降低至 12.93 min, 在 20 min 时乳化稳定性上升至最高 19.52 min。由图 4 以及乳化稳定性变化的幅度可知, 煮制鲜食小麦蛋白的乳化稳定性要高于炒制鲜食小麦蛋白, 且随着加工时间的延长, 两种热处理的鲜食小麦蛋白在 10 min 时的乳化稳定性差异不显著, 而在加工 10 min 后两种热处理的鲜食

小麦蛋白的乳化稳定性差异逐渐显著 ($p<0.05$)。

出现上述情况的原因可能是适度的热处理会增大鲜食小麦蛋白分子的柔顺性, 促使乳化性的上升, 但过度的热处理会导致蛋白质过度变性产生许多聚集体, 使分子的柔顺性降低, 溶解度降低, 从而导致其乳化效果明显下降^[31]。王金梅^[32]研究发现热处理会使蛋白的乳化性上升, 且证明了热处理后的蛋白确实比未热处理的蛋白具有更加柔顺性的构象, 这与本实验研究结果较为相似。随着加工时间的延长, 蛋白分子柔韧性不断增强, 使热处理后的鲜食小麦蛋白的乳化稳定性增强。基于这些特性, 可将其应用于面包, 牛奶, 蛋糕, 汤圆, 糯米丸子中。

2.3 起泡性、泡沫稳定性的比较分析

蛋白质的起泡性和泡沫稳定性在一些食品领域也是起着十分重要的作用, 其主要受蛋白浓度、pH 值、温度等因素的影响。

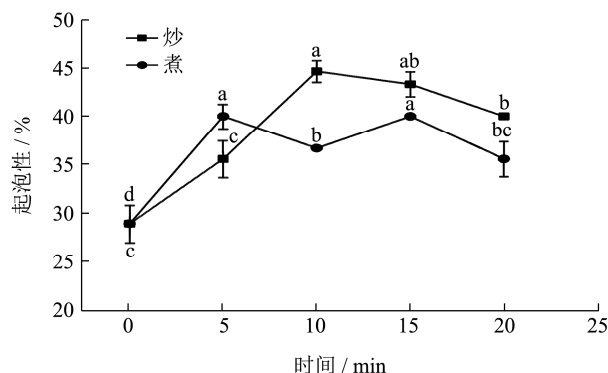


图 5 不同加工方式下鲜食小麦蛋白起泡性的变化

Fig.5 The changes of foamability of fresh wheat protein under different processing methods

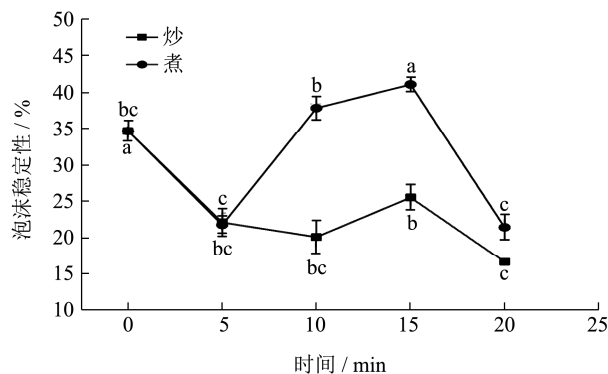


图 6 不同加工方式下鲜食小麦蛋白泡沫稳定性的变化

Fig.6 The changes of foam stability of fresh wheat protein under different processing methods

在炒制和煮制两种加工方式下鲜食小麦蛋白起泡性和泡沫稳定性的变化分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知, 热处理前鲜食小麦蛋白的起泡性为 28.89%, 炒制和煮制鲜食小麦蛋白的起泡性最高值分别为

44.67%、40.00%，随着加工时间的延长，两种热处理的鲜食小麦蛋白的起泡性均呈先上升后下降的趋势，煮制的起泡性先从 28.89% 上升至 40.00%，后下降至 36.22%；炒制的起泡性先从 28.89% 上升至 44.67%，后下降至 40.00%。且炒制鲜食小麦蛋白的起泡性大于煮制鲜食小麦蛋白的，炒制鲜食小麦蛋白的起泡性在 10 min 时达到最佳为 44.67%，且在 10 min 时炒制鲜食小麦蛋白的起泡性 44.67% 显著高于煮制 36.67% ($p < 0.05$)。在热处理过程中，起泡性先呈现上升趋势的原因可能是因为热处理使蛋白质被破坏，暴露更多的疏水性氨基酸，提高空气与鲜食小麦蛋白结合的能力，进而提高鲜食小麦蛋白的起泡能力。张舒等^[16]也发现了采用蒸制和煮制处理绿豆，绿豆蛋白的起泡性也显著提高，与本研究结果较一致，但随着热处理时间的增加，起泡性呈现下降的趋势，可能是因为过度的热处理减弱了鲜食小麦蛋白的肽链柔软程度，致使起泡性减弱。

由图 6 可知，热处理前鲜食小麦蛋白泡沫稳定性为 34.72%，炒制和煮制鲜食小麦蛋白的泡沫稳定性在 15 min 时分别为 25.55%、41.11%。总体来看，炒制和煮制鲜食小麦蛋白的泡沫稳定性均呈先降低后升高再降低的趋势，炒制的泡沫稳定性先从 34.72% 降低至 20.10%，后上升至 25.55%，在 20 min 时泡沫稳定性又降低至 16.67%；煮制的泡沫稳定性先从 34.72% 降低至 21.78%，后上升至最高 41.11%，在 20 min 时泡沫稳定性又降低至 21.44%。这可能是由于热处理初始时鲜食小麦蛋白结构被破坏，单体分子增多，溶解度降低，使得鲜食小麦蛋白泡沫稳定性降低。适当时间的热处理后，鲜食小麦蛋白中含有的单体分子逐渐分解成具有可溶性的小分子蛋白，溶解度上升，故鲜食小麦的泡沫稳定性呈增长趋势；但随着热处理时间的延长，鲜食小麦蛋白的溶解度逐渐降低，致使鲜食小麦蛋白形成的泡沫厚度，强度减弱，因此泡沫稳定性又呈现下降的趋势。这与乔立文^[33]认为蛋白的起泡稳定性降低是由于蛋白及其复合物分解导致的研究一致。此外，蛋白的起泡性和泡沫稳定性可赋予食品松软的结构和良好且独特的口感，基于此性质可将其应用于冰激凌、蛋奶酥、棉花糖、土司面包，奶油蛋糕等产品中。

2.4 溶解性比较分析

溶解性是评价蛋白质应用性的一个至关重要的指标，它易受 pH 值、温度、离子强度等因素的影响^[34]。溶解性好的蛋白质易于食品的加工利用，同时有利于增加食品的营养价值，如功能型饮料等。

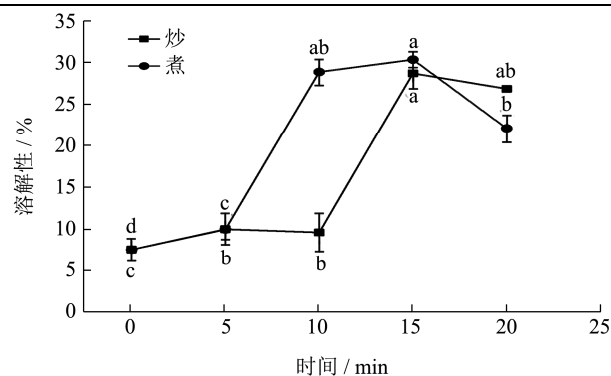


图 7 不同加工方式下鲜食小麦蛋白溶解性的变化

Fig.7 The changes of solubility of fresh wheat protein under different processing methods

在炒制和煮制两种加工方式下鲜食小麦蛋白的溶解度的变化如图 7 所示。由图 7 可知，两种加工方式下鲜食小麦蛋白的溶解性均随热处理时间的增加呈先上升后下降的趋势，炒制的溶解性先从 7.51% 升高至 28.66%，后下降至 26.80%；煮制的溶解性先从 7.51% 升高至 30.31%，后下降至 22.04%。在 10 min 时煮制鲜食小麦蛋白的溶解度 28.83% 要显著高于炒制鲜食小麦蛋白的溶解度 9.57% ($p < 0.01$)，且在 15 min 时，两种加工方式下鲜食小麦蛋白的溶解性均达到最佳，此时，炒制和煮制鲜食小麦蛋白的溶解度分别为 28.66%、30.31%。在热处理加工过程中，初期鲜食小麦蛋白分解成可溶性小分子蛋白，随着热处理加工时间的延长，小分子蛋白又重新聚集成不溶性的大分子蛋白，所以煮制和炒制的鲜食小麦蛋白的溶解度呈先上升后下降的趋势^[35]。李爽等^[36]研究发现热处理后完全变性的葵花蛋白的溶解性开始下降，这与本实验热处理 15 min 后的实验结果相一致，还有张舒等^[16]研究发现热处理 20 min 后完全变性的绿豆蛋白的溶解度也开始下降，与本实验研究结果较为相似，导致蛋白变性所需热处理时间的不同可能是因为与绿豆蛋白相比鲜食小麦蛋白的成分和结构较简单，水溶性蛋白含量较高，在加热环境下易变性。因此，在食品生产过程中，可以采用适度热加工条件来避免蛋白溶解度的下降，进而保持食品的功能特性。

2.5 功能特性的综合评价

2.5.1 功能特性主成分分析

主成分分析法可将较多的评价指标降维成几个互不相关的综合指标，这些综合指标能够反应所有指标提供的大部分信息^[37]。因此，本文对不同加工方式下鲜食小麦蛋白的持水性、持油性、乳化性、乳化稳定性、起泡性、泡沫稳定性以及溶解性进行主成分分析。运用 MATLAB R2014a 求出各个主成分的特征值、贡

献率和累计贡献率, 如表 1 所示。

依据主成分特征值 $\lambda \geq 1$ 的基本原则, 煮制和炒制加工方式分别提取 3 个主成分。煮制加工方式提取的 3 个主成分的贡献率分别为 46.56%、34.37% 和 19.06%, 累积贡献率为 99.99%。炒制加工方式提取的 3 个主成分的贡献率分别为 46.65%、30.30% 和 23.03%, 累积贡献率为 99.98%, 能够反应功能特性的大部分信息。因此, 可以用前 3 个主成分(分别定义为 PC1、PC2、PC3) 对不同加工方式鲜食小麦蛋白的功能特性进行综合评价。煮制加工方式提取的 3 个主成分对应的得分(分别定义为 F1、F2、F3) [38]为:

$$F1=0.202x_1+0.544x_2+0.340x_3-0.402x_4+0.413x_5+0.430x_6+0.174x_7 \quad (7)$$

$$F2=0.580x_1-0.035x_2-0.024x_3-0.025x_4-0.352x_5+0.405x_6+0.611x_7 \quad (8)$$

$$F3=0.212x_1-0.155x_2+0.683x_3+0.594x_4+0.330x_5-0.022x_6+0.047x_7 \quad (9)$$

炒制加工方式提取的 3 个主成分对应的得分(分别定义为 F4、F5、F6)为:

$$F4=0.305x_1+0.322x_2-0.457x_3+0.551x_4+0.140x_5-0.417x_6+0.312x_7 \quad (10)$$

$$F5=0.152x_1+0.547x_2+0.305x_3-0.020x_4+0.335x_5+0.451x_6+0.519x_7 \quad (11)$$

$$F6=0.633x_1-0.127x_2+0.274x_3-0.071x_4+0.658x_5-0.006x_6-0.264x_7 \quad (12)$$

表 1 主成分特征值、贡献率和累计贡献率

Table 1 Eigenvalue, contribution rate and cumulative contribution rate of principal component

热处理方式	主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
煮制	1	3.26	46.56	46.56
	2	2.41	34.37	80.93
	3	1.33	19.06	99.99
炒制	1	3.27	46.65	46.65
	2	2.12	30.30	76.95
	3	1.61	23.03	99.98

由表 1 和表 2 可知, 煮制加工方式 PC1 的贡献率为 46.56%。在得分 F1 的表达式中, 持油性(x2) 系数最大; PC2 的贡献率为 34.37%, 在得分 F2 的表达式中, 持水性(x1), 溶解性(x7) 系数最大; PC3 的贡献率为 19.06%, 在得分 F3 的表达式中, 乳化性(x3), 乳化稳定性(x4) 系数最大。综上所述, 持水性、持油性、乳化性、乳化稳定性和溶解性可作为煮制加工方式鲜食小麦蛋白功能特性的综合指标。

表 2 各主成分的特征向量

Table 2 Eigenvectors of principal components

加工方式	功能特性	特征向量		
		PC1	PC2	PC3
煮制	持水性(x1)	-0.202	0.580	0.212
	持油性(x2)	0.544	-0.035	-0.155
	乳化性(x3)	0.340	-0.024	0.683
	乳化稳定性(x4)	-0.402	-0.025	0.594
	起泡性(x5)	0.413	-0.352	0.330
	起泡稳定性(x6)	0.430	0.405	-0.022
	溶解性(x7)	0.174	0.611	0.047
炒制	持水性(x1)	0.305	-0.152	0.633
	持油性(x2)	0.322	0.547	-0.127
	乳化性(x3)	-0.457	0.305	0.274
	乳化稳定性(x4)	0.551	-0.020	-0.071
	起泡性(x5)	0.140	0.335	0.658
	起泡稳定性(x6)	-0.417	0.451	-0.006
	溶解性(x7)	0.312	0.519	-0.264

对于炒制加工方式而言, PC1 的贡献率为 46.65%, 在得分 F4 的表达式中, 乳化稳定性(x4) 系数最大; PC2 的贡献率为 30.30%, 在得分 F5 的表达式中, 持油性(x2), 溶解性(x7) 系数最大; PC3 的贡献率为 23.03%, 在得分 F6 的表达式中, 起泡性(x5), 持水性(x1) 系数最大。综上所述, 持水性、持油性、乳化稳定性、起泡性和溶解性可作为炒制加工方式鲜食小麦蛋白功能特性的综合指标。

2.5.2 功能特性综合评价

在煮制和炒制加工方式下不同处理时间提取的各主成分的得分和综合得分情况如表 3 所示, 综合得分是根据 $F=\lambda_1F_1+\lambda_2F_2+\lambda_3F_3$ (λ 为贡献率) [39] 计算得出。综合得分越高, 表明鲜食小麦蛋白的功能特性越好; 反之, 则表明鲜食小麦蛋白的功能特性越差[40]。从表 3 中可以看出, 煮制 5 min、10 min、15 min 和 20 min 鲜食小麦蛋白的功能特性的综合得分分别为 16.29、27.14、29.43 和 18.79, 其中煮制 15 min 时的综合得分最高(29.43), 证明煮制 15 min 时鲜食小麦蛋白的功能特性最好。而炒制 5 min、10 min、15 min 和 20 min 鲜食小麦蛋白的功能特性的综合得分分别为 5.87、6.38、13.52 和 14.08, 其中炒制 20 min 时的综合得分最高(14.08), 证明在炒制条件下炒制 20 min 鲜食小麦蛋白的功能特性最好。煮制和炒制加工方式相比, 煮制的鲜食小麦蛋白功能特性的综合得分普遍比炒制的高, 证明煮制的加工方式更适宜加工鲜食小麦。

表 3 功能特性的评价得分

Table 3 Evaluation score of functional characteristic

加工方式	处理时间/min	各主成分得分			
		主成分 1 得分 (F1)	主成分 2 得分 (F2)	主成分 3 得分 (F3)	综合得分 (F)
煮制	5	23.99	1.40	24.31	16.29
	10	33.58	21.40	21.76	27.14
	15	36.01	22.39	26.06	29.43
	20	21.50	11.19	25.85	18.79
炒制	5	4.68	28.82	-21.93	5.87
	10	7.48	30.93	-28.15	6.38
	15	11.24	43.97	-21.89	13.52
	20	15.77	37.31	-19.89	14.08

2.6 SDS-PAGE 分析

在炒制和煮制两种热处理加工方式下不同热处理时间的鲜食小麦蛋白的电泳图谱如图 8 所示。图 8 中共有 9 泳道，其中 5 泳道为鲜食小麦蛋白的条带，均有 6 个鲜食小麦蛋白亚基条带，分别为 104.30 ku、90.40 ku、37.60 ku、26.80 ku、21.20 ku、14.70 ku。

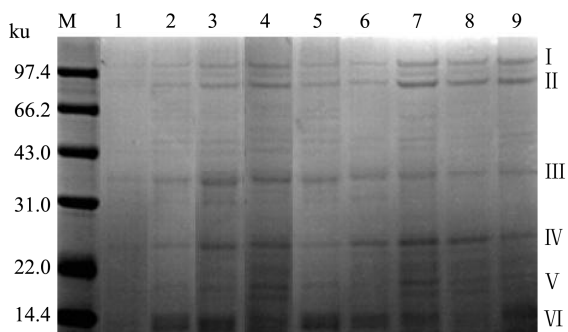


图 8 炒制和煮制两种加工方式下鲜食小麦蛋白的 SDS-PAGE 电泳图谱

Fig.8 SDS-PAGE electrophoretogram of fresh wheat protein under two processing methods of frying and cooking

注：M 泳道：标准蛋白；1 泳道：炒制 5 min；2 泳道：炒制 10 min；3 泳道：炒制 15 min；4 泳道：炒制 20 min；5 泳道：热处理 0 min；6 泳道：煮制 5 min；7 泳道：煮制 10 min；8 泳道：煮制 15 min；9 泳道：煮制 20 min。

由图 8 可知，在相同热处理加工方式下，随着加工时间的增加，鲜食小麦蛋白中大分子量的蛋白亚基条带颜色逐渐变浅，而小分子量的蛋白亚基条带颜色逐渐加深，即鲜食小麦大分子量蛋白逐渐降解为小分子量蛋白。这可能主要是因为热处理破坏了蛋白质的内部空间结构，造成肽链展开断裂，促使大分子量蛋白分解成小分子量蛋白，这与蛋白的功能特性相对应。两种热处理加工方式相比，煮制鲜食小麦蛋白中的一条分子量为 21.20 ku V 基条带随热处理时间的延长逐渐消失，而炒制鲜食小麦中的 21.20 ku V 基条带随热

处理时间的延长逐渐显现，说明在炒制过程中鲜食小麦蛋白中慢慢出现了分子量为 21.20 ku 的蛋白亚基条带，与张舒等^[16]发现煮制绿豆蛋白中增加了一条 35.40 ku 的条带的情况较为相似。此外，煮制的鲜食小麦蛋白中的小分子条带颜色较炒制的深，含量较多。结合上述不同加工方式鲜食小麦蛋白功能特性的综合得分可知，煮制湿热处理加工方式更适合加工鲜食小麦，保持良好的功能特性。

3 结论

本研究通过炒制和煮制两种热处理加工方式对鲜食小麦进行加工，再利用碱提酸沉法提取鲜食小麦蛋白，并对其结构和功能特性的测定，同时借助主成分分析法对不同加工方式鲜食小麦蛋白的功能特性进行综合评价，找到鲜食小麦的最适加工方式。电泳结果表明炒制和煮制的鲜食小麦蛋白中小分子蛋白亚基条带颜色均随热处理时间的增加而变深，即小分子蛋白含量均增加，且煮制鲜食小麦蛋白中的分子量为 21.20 ku 的条带逐渐消失，而炒制鲜食小麦蛋白中的此条带则逐渐显现。同时，功能特性研究结果表明与原鲜食小麦蛋白相比，炒制和煮制的鲜食小麦蛋白的持水性分别增加了 51.60%、144.60%，持油性分别增加了 9.80%、10.30%，乳化性分别增加了 218.50%、200%，且乳化稳定性分别增加了 3.80%、34.10%，起泡性分别增加了 54.60%、38.50%，溶解性分别增加了 2.8 倍、3.0 倍。而炒制的鲜食小麦蛋白起泡稳定性减少了 26.50%，煮制的鲜食小麦蛋白的起泡稳定性增加了 18.40%，证明两种热处理的鲜食小麦蛋白的持水性、持油性、乳化性等功能特性均得到改善，且优于未热处理加工的原鲜食小麦蛋白。主成分分析结果表明，煮制 15 min 时的综合得分最高为 29.43，而在炒制条件下炒制 20 min 时的综合得分最高为 14.08，煮制和炒制加工方式相比，煮制的鲜食小麦蛋白功能特

性的综合得分比炒制的高。因此,炒制和煮制两种热处理加工方式都会使鲜食小麦蛋白功能特性得以改善,使其更有益于保持食品的风味以及提升鲜食小麦产品的品质,且煮制比炒制更能提升鲜食小麦蛋白的功能特性。

参考文献

- [1] 卫阿枝,张国治,李长根.添加青麦仁粉对小麦粉特性的影响研究[J].粮食与油脂,2019,32(12):42-45
WEI A-zhi, ZHANG Guo-zhi, LI Chang-gen. The effect of adding green wheat kernel flour on the characteristics of wheat flour [J]. Cereals and Oils, 2019, 32(12): 42-45
- [2] 温青玉,张康逸,屈凌波,等.青麦仁分离蛋白理化性质及功能特性的研究[J].食品工业科技,2020,41(9):26-33
WEN Qing-yu, ZHANG Kang-yi, QU Ling-bo, et al. Study on the physical and chemical properties and functional properties of green wheat kernel protein isolate [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 26-33
- [3] 温青玉,张康逸,杨帆,等.小麦分离蛋白质理化性质及功能特性研究[J].河南农业科学,2018,47(5):149-154
WEN Qing-yu, ZHANG Kang-yi, YANG Fan, et al. Study on the physical and chemical properties and functional properties of wheat protein isolate [J]. Henan Agricultural Sciences, 2018, 47(5): 149-154
- [4] 吴孟学.一种青麦酱的制作方法:中国,201810078064.1[P]. 2018-01-26
WU Meng-xue. A method of making green wheat sauce: China, 201810078064.1 [P]. 2018-01-26
- [5] 张康逸,康志敏,王莉,等.捻转制作过程中理化性质及蛋白质特性的变化[J].现代食品科技,2020,36(5):200-206
ZHANG Kang-yi, KANG Zhi-min, WANG Li, et al. Changes in physicochemical properties and protein properties during the twisting process [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 200-206
- [6] 张康逸,康志敏,马珊珊,等.青麦糕加工工艺研究[J].河南农业科学,2013,42(10):149-152
ZHANG Kang-yi, KANG Zhi-min, MA Shan-shan, et al. Research on the processing technology of green wheat cake [J]. Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(10): 149-152
- [7] 康志敏,张康逸,崔满满,等.青麦仁粽子加工工艺及品质分析[J].食品科学,2015,36(8):81-85
KANG Zhi-min, ZHANG Kang-yi, CUI Man-man, et al. Processing technology and quality analysis of green wheat kernel rice dumplings [J]. Food Science, 2015, 36(8): 81-85
- [8] 杨帆.青麦仁加工、储藏中营养成分保持研究及加工生产线设计[D].郑州:河南工业大学,2016
YANG Fan. Research on the maintenance of nutrients in the processing and storage of green wheat kernels and design of the processing production line [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016
- [9] 刘杰.青麦仁加工让小麦轻松增值[J].科学种养,2014,2:58-59
LIU Jie. The processing of green wheat kernels makes wheat easy to add value [J]. Scientific Planting and Raising, 2014, 2: 58-59
- [10] 张康逸,屈凌波.鲜食全谷物加工技术研究进展[J].粮食加工,2015,40(6):1-11
ZHANG Kang-yi, QU Ling-bo. Research progress in fresh whole grain processing technology [J]. Cereal Processing, 2015, 40(6): 1-11
- [11] 吴晓伟,潘冬梅,全银山.基于营养品质控制的芹菜热处理工艺研究[J].包装与食品机械,2014,32(1):19-22,34
WU Xiao-wei, PAN Dong-mei, TONG Yin-shan. Research on heat treatment process of celery based on nutritional quality control [J]. Packaging & Food Machinery, 2014, 32(1): 19-22, 34
- [12] 李俊芳,马永昆,张荣,等.不同果桑品种成熟桑椹的游离氨基酸主成分分析和综合评价[J].食品科学,2016,37(14):132-137
LI Jun-fang, MA Yong-kun, ZHANG Rong, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of free amino acids in different mature mulberry varieties [J]. Food Science, 2016, 37(14): 132-137
- [13] 李杰,陶海腾,崔波.挤压加工对粮油蛋白营养价值的影响[J].齐鲁工业大学学报,2018,32(4):49-52
LI Jie, TAO Hai-teng, CUI Bo. The effect of extrusion processing on the nutritional value of grain and oil protein [J]. Journal of Qilu University of Technology, 2018, 32(4): 49-52
- [14] Wittayachai L, Benjakul S, Tanaka M. Characteristics and antioxidative activity of maillard reaction products from a porcine plasma protein-glucose model system as influenced by pH [J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 669-677
- [15] Chandrasiri S D, Liyanage R, Vidanarachchi J K, et al. Does processing have a considerable effect on the nutritional and functional properties of mung bean (*vigna radiata*) [J]. Procedia Food Science, 2016, 6: 352-355
- [16] 张舒,王长远,盛亚男,等.不同加工方式对绿豆蛋白亚基和功能性质的影响[J].食品科学,2019,40(19):113-119
ZHANG Shu, WANG Chang-yuan, SHENG Ya-nan, et al. Effects of different processing methods on mung bean protein

- subunits and functional properties [J]. Food Science, 2019, 40(19): 113-119
- [17] Macritchie F, Gras P W, Csiro. The role of flour lipids in baking [J]. Cereal Chemisrty, 1973, 50: 292-302
- [18] Hashimoto J M, Nabeshina E H, China H S, et al. Effect of processing conditions on some functional characteristics of extrusion-cooked cassava starch/wheat gluten blends [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2002, 82(8): 924-930
- [19] 孙媛,改良 Osborne 法分级分离四种小麦蛋白的研究[D]. 广州:华南理工大学,2015
- SUN Yuan. Study on the fractionation of four wheat proteins by modified Osborne method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- [20] Yin S W, Tang C H, Wen Q B, et al. Functional properties and *in vitro* trypsin digestibility of re kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolate: effect of high-pressure treatment [J]. Food Chemistry, 2008, 110(4): 938-945
- [21] 杨锋,刘雪,任仙娥,等.不同商用大豆分离蛋白结构特征和功能性质的比较[J].现代食品科技,2016,32(9):107-115
- YANG Feng, LIU Xue, REN Xian-e, et al. Comparison of structural and functional properties of different commercial soybean protein isolates [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(9): 107-115
- [22] 朴金苗,都凤华,齐斌,马铃薯分离蛋白的溶解性和乳化性研究[J].食品科学,2009,30(17):91-94
- PIAO Jin-miao, DU Feng-hua, QI Bin. Study on the solubility and emulsification of potato protein isolate [J]. Food Science, 2009, 30(17): 91-94
- [23] 张国敏.种子贮藏蛋白亚基缺失大豆种质的鉴定及其蛋白质功能性评价与 α 亚基缺失的分子机制[D].南京:南京农业大学,2014
- ZHANG Guo-min. Identification of soybean germplasm lacking seed storage protein subunits, evaluation of protein functionality and molecular mechanism of α subunit deletion [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014
- [24] 周小理,侍荣华,周一鸣,等.热处理方式对苦荞蛋白功能特性的影响[J].农业工程学报,2018,34(9):292-298
- ZHOU Xiao-li, SHI Rong-hua, ZHOU Yi-ming, et al. Effect of heat treatment on functional properties of Tartary buckwheat protein [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(9): 292-298
- [25] 刘冬儿,吕天喜.绿豆分离蛋白的制备及其功能特性的研究[J].粮食与食品工业,2007,14(2):27-30
- LIU Dong-er, LYU Tian-xi. Study on the preparation and functional properties of mung bean protein isolate [J]. Cereal and Food Industry, 2007, 14(2): 27-30
- [26] 康怀彬,邹良亮,张慧芸,等.高温处理对牛肉蛋白质化学作用力及肌原纤维蛋白结构的影响[J].食品科学,2018,39(23): 80-86
- KANG Huai-bin, ZOU Liang-liang, ZHANG Hui-yun, et al. The effect of high temperature treatment on the chemical action of beef protein and the structure of myofibril protein [J]. Food Science, 2018, 39(23): 80-86
- [27] Tugba O, Esra C, Filiz A. A review on protein-phenolic interactions and associated changes [J]. Food Research International, 2013, 51(2): 954-970
- [28] Murray B S. Rheological properties of protein films [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2011, 16(1): 27-35
- [29] 丁一,黄莉,夏秀芳,等.冻藏对肌原纤维蛋白结构特性与功能特性的影响[J].包装与食品机械,2013,31(4):55-59
- DING Yi, HUANG Li, XIA Xiu-fang, et al. The effect of frozen storage on the structural and functional properties of myofibril protein [J]. Packaging & Food Machinery, 2013, 31(4): 55-59
- [30] Ghribi A M, Gafsi I M, Sila A, et al. Effects of enzymatic hydrolysis on conformational and functional properties of chickpea protein isolate [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 322-330
- [31] Zhang S B, Lu Q Y. Characterizing the structural and surface properties of proteins isolated before and after enzymatic demulsification of the aqueous extract emulsion of peanut seeds [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 47(4): 51-60
- [32] 王金梅.大豆蛋白热聚集行为及界面、乳化性质研究[D].广州:华南理工大学,2012
- WANG Jin-mei. Thermal aggregation behavior, interface and emulsification properties of soybean protein [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012
- [33] 乔立文.机械剪切与热处理对于鸡蛋全蛋液功能性质的影响[D].无锡:江南大学,2011
- QIAO Li-wen. The effect of mechanical shearing and heat treatment on the functional properties of whole egg liquid [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011
- [34] 苏丹,李树君,赵凤敏,等.超高压对大豆蛋白结构和功能性影响研究进展[J].包装与食品机械,2009,27(5):111-115
- SU Dan, LI Shu-jun, ZHAO Feng-min, et al. Research progress on the effects of ultrahigh pressure on the structure and functional properties of soybean protein [J]. Packaging &

- Food Machinery, 2009, 27(5): 111-115
- [35] 江连洲,陈思,李杨,等.大豆分离蛋白-花青素复合物的制备及其蛋白结构与功能性质分析[J].食品科学,2018,39(10): 20-27
JIANG Lian-zhou, CHEN Si, LI Yang, et al. Preparation of soybean protein isolate-anthocyanin complex and analysis of protein structure and functional properties [J]. Food Science, 2018, 39(10): 20-27
- [36] 李爽.热处理及淀粉添加对葵花分离蛋白结构与流变学性质的影响[D].齐齐哈尔:齐齐哈尔大学,2016
LI Shuang. The effect of heat treatment and starch addition on the structure and rheological properties of sunflower protein isolate [D]. Qiqihar: Qiqihar University, 2016
- [37] 张旭,王卫,白婷,等.四川浅发酵香肠加工进程中挥发性风味物质测定及其主成分分析[J].现代食品科技,2020,36(10): 274-283
ZHANG Xu, WANG Wei, BAI Ting, et al. Determination of volatile flavor substances and principal component analysis in the processing of Sichuan light fermented sausage [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 274-283
- [38] 王丽艳,荆瑞勇,郭永霞,等.基于氨基酸含量的市售 14 种食用蘑菇的综合评价[J/OL].食品科学:1-11[2020-11-27].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200427.1626.026.html>
WANG Li-yan, JING Rui-yong, GUO Yong-xia, et al. Comprehensive evaluation of 14 commercially available edible mushrooms based on amino acid content [J/OL]. Food Science: 1-11[2020-11-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200427.1626.026.html>
- [39] 张康逸,何梦影,康志敏,等.青麦仁代餐粉的配方优化[J].现代食品科技,2020,36(1):184-191
ZHANG Kang-yi, HE Meng-ying, KANG Zhi-min, et al. Optimization of Green Wheat Berry Meal Replacement Powder Formula [J]. Modern Food Technology, 2020, 36(1): 184-191
- [40] 黄晶玲,江汉美,邸江雪,等.HS-SPME-GC-MS 和主成分分析比较枇杷叶、花、茎的挥发性成分[J].现代食品科技,2019, 35(6):295-300
HUANG Jing-ling, JIANG Han-mei, DI Jiang-xue, et al. Comparison of volatile components of loquat leaves, flowers and stems with HS-SPME-GC-MS and principal component analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(6): 295-300

(上接第 168 页)

- [14] 杨月欣.中国食物成分表标准版[M].北京:北京大学医学出版社,2018,324-326
YANG Yue-xin. China Food Composition Tables Standard Edition [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2018, 324-326
- [15] Vernon R Y, Peter L P. Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1994, 59(supply): 1203-1212
- [16] FAO/WHO. Report of a joint FAO/WHO ad hoc expert committee: Rom energy and protein requirements [C]//World Health Organization: Switzerland, 1983: 36-38
- [17] 夏金丹.蛋白质优化型青稞黄豆八宝粥的研制及其消化特性研究[D].杭州:浙江大学,2013
XIA Jin-dan. The development of a protein-optimized eight-ingredient porridge with highland barley and soybean as well as the study of its digestive characteristics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013
- [18] 刘义凤,段盛林,柳嘉,等.低升糖八宝粥的自稳定体系筛选及其 GI 人体测试[J].食品科学,2020,41(5):143-151
LIU Yi-feng, DUAN Sheng-lin, LIU Jia, et al. Screening for self-stabilizing system for mixed congee with low glycemic Index and wvaluation of its GI in the human body [J]. Food Science, 2020, 41(5): 143-151
- [19] 洪雁,顾娟,顾正彪.体内外实验测定荞麦淀粉消化特性[J].食品科学,2010,31(5):293-297
HONG Yan, GU Juan, GU Zheng-biao. Digestion properties of buckwheat starch [J]. Food Science, 2010, 31(5): 293-297