

外源氨基酸添加对春卷皮面浆体系的影响

马汝悦¹, 钟昔阳^{1,2*}, 王佳林¹, 孙梦瑾¹, 罗水忠^{1,2}, 赵妍嫣^{1,2}, 郑志^{1,2}

(1. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽合肥 230009)

(2. 安徽省农产品精深加工重点实验室, 安徽合肥 230009)

摘要: 氨基酸作为良好的营养、风味增强剂, 其在春卷皮面浆体系的研究鲜有报道, 该研究选取四类八种氨基酸 [碱性氨基酸: 精氨酸 (Arginine, Arg), 赖氨酸 (Lysine, Lys); 酸性氨基酸: 谷氨酸 (Glutamic Acid, Glu), 天冬氨酸 (Aspartic Acid, Asp); 中性氨基酸: 苏氨酸 (Threonine, Thr), 甘氨酸 (Glycine, Gly); 非极性氨基酸: 色氨酸 (Tryptophan, Trp), 蛋氨酸 (Methionine, Met)] 来探究其对制备春卷皮面浆体系流变学与热力学特性、微观结构以及面筋蛋白二级结构的影响。发现碱性和酸性氨基酸的添加增加了面浆粘度, 降低了面浆析水率, 致使体系中游离水含量减少, 面筋蛋白网络结构强度增加, 进而面浆体系连接更紧密; 其中, 碱性氨基酸中的 Arg 降低了面浆中淀粉糊化所需能量焓值 (1.68 至 1.24 J/g); 此外, 加入酸性氨基酸后, 面浆淀粉糊化所需能量增大, 面筋蛋白二级结构中 β -折叠含量减少、 α -螺旋和无规卷曲含量增加。中性和非极性氨基酸的加入降低了面浆粘度, 提高了面浆析水率, 对面浆体系热力学特性影响较小, 同时增加了面筋蛋白二级结构中 β -折叠和 β -转角的含量。该研究以期为氨基酸在面制品中的应用提供相关理论基础。

关键词: 面浆; 外源氨基酸; 热力学特性; 面筋蛋白结构; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2024)04-186-195

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.4.0451

Effect of Exogenous Amino Acid Addition on the Batter System of Spring Roll Wrappers

MA Ruyue¹, ZHONG Xiyang^{1,2*}, WANG Jialin¹, SUN Mengjin¹, LUO Shuizhong^{1,2}, ZHAO Yanyan^{1,2}, ZHENG Zhi^{1,2}

(1.School of Food and Bioengineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2.Key Laboratory for Agricultural Products Processing of Anhui Province, Hefei 230009, China)

Abstract: Amino acids, as good nutritional and flavor enhancers, have been rarely explored in the batter system of spring roll wrappers. Eight amino acids from four categories (basic amino acids: Arg, Lys; acidic amino acids: Glu, Asp; neutral amino acids: Thr, Gly; non-polar amino acids: Trp, Met) were added into the batter system of spring roll wrappers, and the effects of their addition on the rheological and thermodynamic characteristics, microstructure, and secondary structure of the gluten protein were investigated. The results showed that the addition of basic and acidic amino acids increased the

引文格式:

马汝悦,钟昔阳,王佳林,等.外源氨基酸添加对春卷皮面浆体系的影响[J].现代食品科技,2024,40(4):186-195.

MA Ruyue, ZHONG Xiyang, WANG Jialin, et al. Effect of exogenous amino acid addition on the batter system of spring roll wrappers [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 186-195.

收稿日期: 2023-04-16

基金项目: 安徽省重点研究和开发计划项目 (201904f06020019); 校企产学研项目 (W2018JJSKF0526)

作者简介: 马汝悦 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: 18256857307@163.com

通讯作者: 钟昔阳 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮油食品加工, E-mail: xiyangzh@hfut.edu.cn

viscosity of the batter, reduced the water-separating proportion of the batter, and decreased the content of free water in the batter system. In addition, the batter strength of the gluten network structure increased, demonstrating a tighter connection. The Arg in the basic amino acids reduced the energy enthalpy required for starch pasting in flour slurry (1.68 to 1.24 J/g). Moreover, with the addition of acidic amino acids, the energy required for the gelatinization of flour starch in batter increased, and the content of the β -folded structure decreased, along with an increase in the content of the α -helix and random coiling structures in the secondary structure of gluten. The addition of neutral and non-polar amino acids decreased the viscosity of the batter, increased the water-separating proportion of the batter, had little influence on the thermodynamic characteristics of the batter system, and increased the content of the β -fold and β -corner structure in the secondary structure of the gluten protein. This study provides basic knowledge on the application of amino acids in wheat flour products.

Key words: batter; exogenous amino acid; thermodynamic characteristics; gluten protein structure; microstructure

面浆是一个主要由面粉和水组成的复杂流体体系,常用作一些食品煎炸前的外层挂糊^[1],使得食品油炸后产生酥脆的外壳,这不仅提高了产品的口感,而且还降低了产品的含油量^[2]。除此之外,面浆广泛用来制作煎饼^[3]或烘焙食品^[4,5],其在食品领域具有十分重要的地位。

面浆的特性影响和决定了其加工的食品性能和食用品质,国内外的众多研究者围绕面浆体系的特性和应用开展了深入研究^[6-8]。在油炸食品领域的面浆应用方面,近年来一些研究报道了添加食品胶体^[9,10]对面浆流变学特性、降低油炸挂糊食品含油量的影响,发现添加剂的使用对产品品质的提升具有一定积极作用。

春卷是一种我国特色传统油炸食品,其外观色泽金黄、食用酥脆可口,深受消费者青睐。春卷的加工涉及到利用面浆生产春卷皮这一重要操作步骤,面浆的特性对春卷品质产生重要影响^[11]。然而,目前面浆体系研究多集中于蛋糕^[12]、油炸食品外层挂糊^[10]等方面,而对于加工春卷的面浆体系的研究较少。

氨基酸作为天然食品添加剂,对人体有一定的营养价值,且对食品的色、香、味等方面都有所影响^[13]。在面制品领域,添加氨基酸不仅能丰富面制品的营养,还能提高产品的相关性能,如 Koh 等^[14]研究发现,在面团中添加谷氨酸、组氨酸、精氨酸和赖氨酸能提高面粉的混合性能,并且氨基酸的添加降低了面包表皮的 L^* 值,影响其烘焙性能。然而,关于氨基酸在春卷加工中的应用鲜有研究报道。

基于此,本文将氨基酸作为营养强化剂添加到春卷制作中,拟从春卷的面浆体系角度研究不同添加比例(0.0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0%)的四类八种氨基酸对面浆体系流变学、热力学、微观结构的影响,研究取得的成果以期丰富氨基酸应用于春卷加工的相关理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

面粉(水分、碳水化合物、蛋白质、灰分以及其他物质质量分数分别为 14.00%、69.73%、11.50%、0.56%、4.21%),滨州中裕食品有限公司;精制食用盐($\text{NaCl} \geq 99.10\%$),中国盐业股份有限公司;L-精氨酸、L-赖氨酸、L-谷氨酸、L-天冬氨酸、L-色氨酸、L-蛋氨酸、L-苏氨酸、L-甘氨酸(食品级,纯度 $\geq 99.00\%$),河南万邦实业有限公司;KBr(色谱级),上海麦克林生化科技有限公司;其他所用试剂和化学品均为分析级。

1.2 仪器与设备

SM-986S 型家用搅拌机,东莞市顶厨电器科技有限公司;NDJ-1 旋转粘度计,上海昌吉地质仪器有限公司;TA-Xtplus 物性测试仪,英国 Stable 公司;Q200 差示扫描量热仪,美国 TA 公司;KDC-160HR 型高速冷冻离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;Frontier 傅里叶红外光谱仪,美国铂金埃尔默公司;ML31 生物显微镜,广州市明美光电技术有限公司;FV1000 激光共聚焦扫描显微镜,日本奥林帕斯公司。

1.3 实验方法

1.3.1 面浆的制备

面浆制作工艺参照潘燕等^[15]文献中的制作方法并稍作修改:

(1)称样:称取 200 g 小麦粉,0.5 g 食盐,量取 240 mL 蒸馏水,添加氨基酸的比例分别为小麦粉的 0.0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%、1.0% (以总质量为 100% 计);

(2) 混浆：将上述称取的小麦粉和氨基酸置于烧杯中，缓慢加入溶解的食盐溶液，使用搅拌机 100 W 功率匀速搅拌 4 min。

(3) 汤浆：调制好的面浆用保鲜膜密封，置于室温条件下汤浆 3 h。

1.3.2 面浆析水率的测定

参照 Abdel-aal 等^[16]的实验方法并稍作修改，取适量面浆样品置于离心管中，并在离心力为 8 910 g 下离心 30 min，离心后，倒出上层液体，擦净离心管壁上残留的水分，称取底层面浆的质量。面浆析水率计算公式如下：

$$X = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

X ——面浆的析水率，%；

W_0 ——离心管质量，g；

W_1 ——面浆和离心管质量，g；

W_2 ——离心后底层面浆和离心管质量，g。

1.3.3 面浆粘度的测定

面浆粘度使用旋转粘度仪测定。取 200 g 面浆样品置于 250 mL 烧杯，使用 SC4-29 搅拌针以 60 r/min 的速度搅拌面浆 1 min，记录数据。

1.3.4 面浆的气泡大小及分布

参考阮征等^[5]的方法并稍作修改。使用光学显微镜在物镜 $\times 40$ 下对新鲜制备的面浆样品进行观察和拍照，利用 Nano Measurer 软件对面浆的气泡大小及分布情况进行分析。

上述所取面浆样品除空白样品（未添加氨基酸的样品）外，其余各氨基酸添加比例均为 1 wt.%。

1.3.5 面浆热力学特性的测定

使用差示扫描量热仪测定面浆样品的热力学特性，根据 Pycia 等^[17]的方法并稍作修改。取约 10 mg 面浆样品置于坩埚中，使用空坩埚作为参照，将样品从 20 °C 升至 120 °C，升温速率 10 °C/min，氮气作为保护气体流速保持在 50 mL/min。记录并计算样品的糊化起始温度 (T_o)、峰值温度 (T_p)、终止温度 (T_c) 和糊化放热焓值 (ΔH)。

1.3.6 面筋蛋白二级结构的测定

参考吕一鸣等^[18]的实验方法，并稍作修改。取一定量的面浆样品倒入 100 目筛网上，并用手快速在筛网上揉搓出面筋后，将面筋收集并在水中不断揉搓冲洗数次，去除其中的淀粉和水溶性成分，重

复操作直至洗涤液与 KBr 溶液混合无蓝色出现，接着将面筋冷冻干燥，研磨，过 100 目筛，得到面筋蛋白。

面浆蛋白二级结构的测定参考桂俊等^[19]和 Li 等^[20]的方法，并稍做修改。取 2 mg 上述制备的面筋蛋白，加入 0.2 g KBr 混合压片后，通过傅里叶变换红外光谱仪测定蛋白质的二级结构，光谱扫描范围为 400~4 000 cm^{-1} ，扫描次数为 32 次，分辨率为 4 cm^{-1} 。采用 Peak Fit 4.12 软件对酰胺 I 带 1 600~1 700 cm^{-1} 波段进行基线校正、高斯去卷积、二阶导数拟合，计算峰面积确定面筋蛋白二级结构所占比例^[20]，酰胺 I 带波数与面筋蛋白二级结构对应关系为：1 650~1 660 cm^{-1} 为 α -螺旋；1 610~1 640 cm^{-1} 及 1 680~1 690 cm^{-1} 为 β -折叠；1 660~1 680 cm^{-1} 为 β -转角；1 640~1 650 cm^{-1} 为无规卷曲^[21,22]。

上述所取面浆样品除空白样品（未添加氨基酸的样品）外，其余各氨基酸添加比例均为 1%。

1.3.7 面浆体系微观结构分析

取适量面浆样品置于载玻片上，使用罗丹明 B 剂 (0.001%， m/V) 染色，在激光共聚焦显微镜下观察面浆的蛋白质网络结构。罗丹明 B 剂激发波长 561 nm，发射波长 570~620 nm。

1.4 数据分析

所有数据采用 IBM SPSS Statistics 25 单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan's 检验 ($P < 0.05$)，运用 Origin 2021 软件进行绘制图表。实验数据均以平均值 \pm 标准差的形式表示，且所有实验均至少重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 不同种类氨基酸添加比例对面浆析水率的影响

面浆的析水率反映面浆中游离水含量以及面浆的持水能力，是分析面浆品质的一项重要指标。

由图 1 可知，与空白对照（添加 0.0% 氨基酸）相比，加入 0.2% 氨基酸的面浆析水率都明显增大。如图 1a 和 b 所示，碱性氨基酸 (Arg、Lys) 和酸性氨基酸 (Glu、Asp) 四种氨基酸加入后，面浆析水率随着氨基酸添加量的增大而减少，这可能与氨基酸的性质有关，碱性氨基酸 (Arg、Lys) 和酸性氨基酸 (Glu、Asp) 均为亲水的极性氨基酸，且酸性氨基酸中含有较多的 -COOH 等极性基团^[23]，会

吸附面浆体系中大量的游离水,使面浆析水率降低。Zhou 等^[24]在研究 L-精氨酸对猪肉香肠持水力的影响中的结果与本研究结果相似,并指出当添加量为 0.2% L-精氨酸时具有较低的持水力,可能是由于体系中含有较高的水分含量。

如图 1c 和 d 所示,中性氨基酸(Thr、Gly)和非极性氨基酸(Trp、Met)不同添加量的面浆析水率都高于空白对照,其中 Met 和 Thr 的面浆析水率在氨基酸添加量为 0.4% 时最低,在 0.4%~1.0% 添加量之间,面浆析水率随着氨基酸添加量的增加而增大。

有研究表明,面浆中游离水含量过高,会冲散蛋白质组织结构,使蛋白质网络结构密度变小,面浆的品质下降^[25]。碱性和酸性氨基酸均为带电荷的氨基酸,带电荷氨基酸的加入降低了面浆的析水率,使面浆体系中游离水含量减少。因此,带电荷氨基酸的加入使体系中游离水含量降低对面浆品质产生积极作用,进而对最终产品的品质有着积极的影响。

2.2 不同种类氨基酸添加比例对面浆粘度的影响

如图 2 所示,与对照组相比,加入碱性氨基酸(Arg、Lys)和酸性氨基酸(Glu、Asp)的面浆粘度都显著增大($P<0.05$),并且随着添加量的增加,面浆粘度也逐渐增大。一方面,氨基酸的酸碱性会影响面浆的粘度,其中酸性环境下,面浆中会含有较多的正离子,导致面筋蛋白之间的排斥作用过大^[26],从而导致面浆粘度升高,碱性氨基酸使淀粉链间排斥力增大^[27],从而导致面浆粘度增加;另一方面,氨基酸具有结合水分的能力,由图 1 可以看出,加入碱性和酸性氨基酸后,面浆析水率降低,由此说明,氨基酸结合了体系中更多水分,使体系中游离水含量减少,从而导致面浆粘度增大。除此之外,加入两种酸性氨基酸后面浆粘度值最高,这可能是由于酸性氨基酸中含有两个 $-COOH$ ^[23],而大量的 $-COOH$ 与水结合发生水合作用,导致面浆体系中的游离水含量减少,面浆体系稠度增加,从而导致面浆粘度增加。

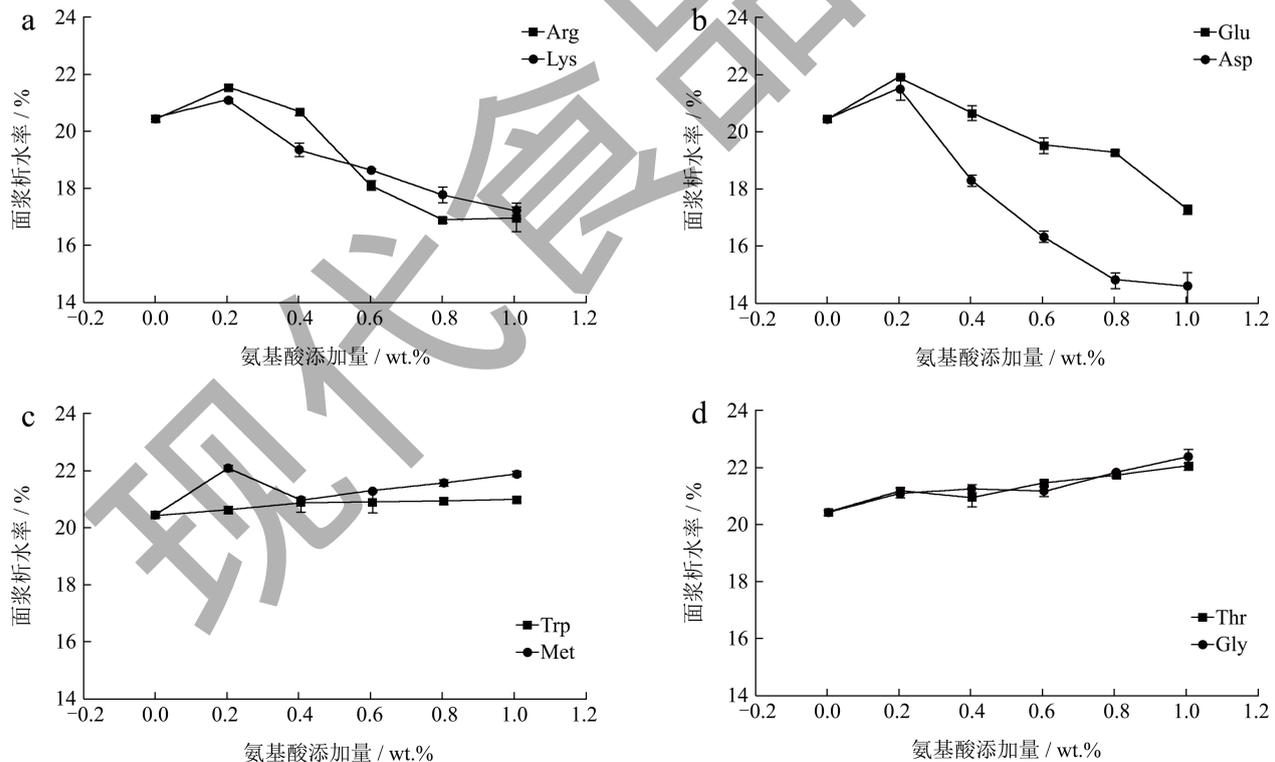


图 1 不同种类氨基酸添加比例对面浆析水率的影响

Fig.1 Effect of different amino acid addition ratios on water separating proportion of the batter

注:(a) 碱性氨基酸;(b) 酸性氨基酸;(c) 非极性氨基酸;(d) 中性氨基酸。

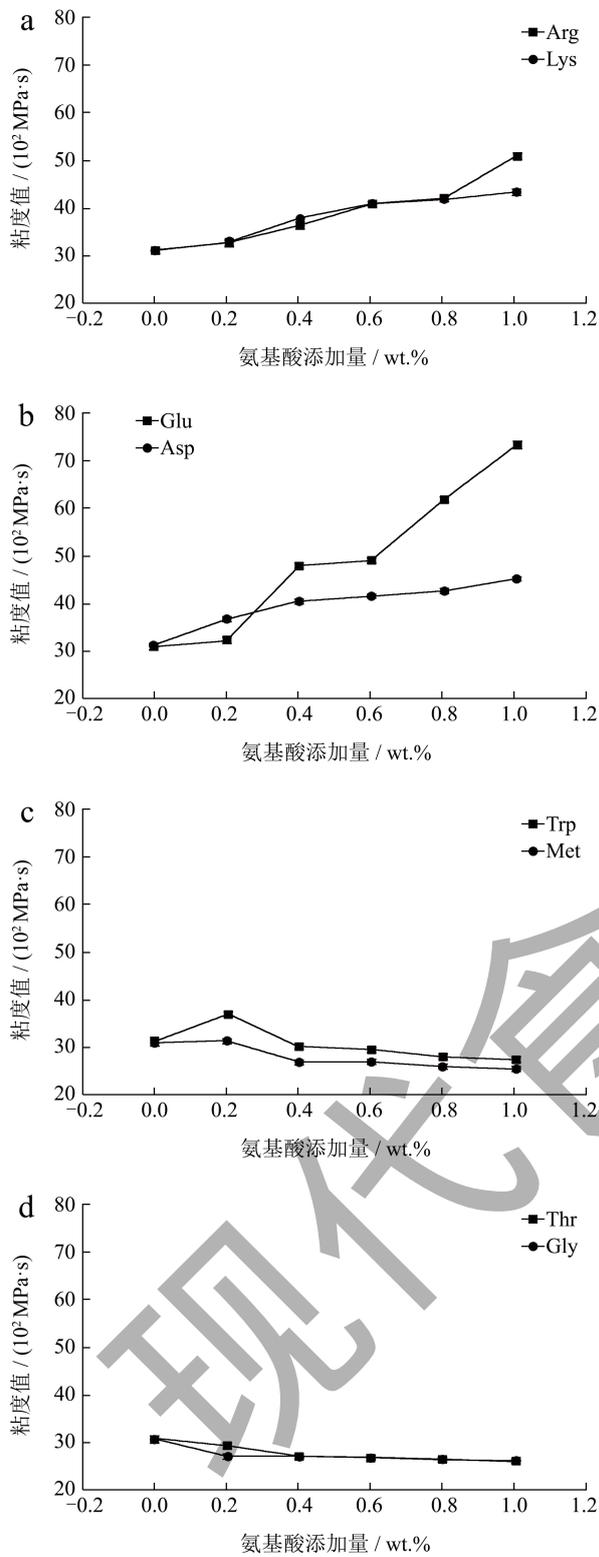


图2 不同种类氨基酸添加比例对面浆粘度的影响

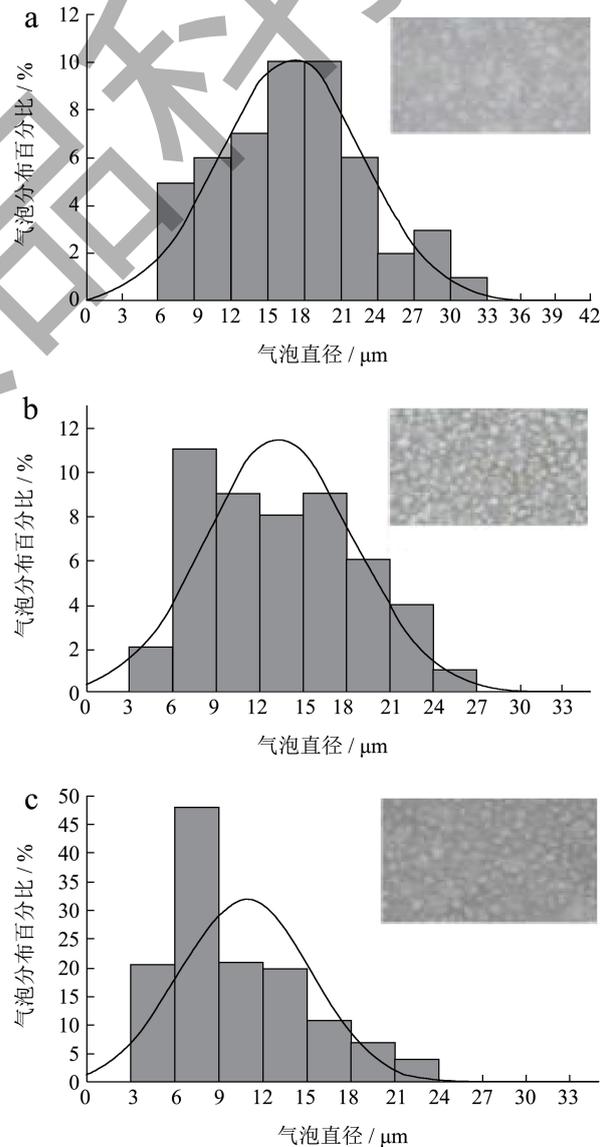
Fig.2 Effect of different amino acid addition ratios on viscosity of the batter

注：(a) 碱性氨基酸；(b) 酸性氨基酸；(c) 非极性氨基酸；(d) 中性氨基酸。

然而，加入中性和非极性氨基酸（四种不带电荷的氨基酸：Thr、Gly、Trp、Met）的面浆粘度有所降低，但相对于酸性和碱性氨基酸，中性和非极性的氨基酸对面浆体系影响较小，这可能是由于不同种类氨基酸在水中的结构和所带电荷不同，氨基酸的游离氨基和羧基以及非极性侧链与面浆体系中的淀粉分子的羟基相互作用也有所不同。

2.3 不同种类氨基酸添加比例对面浆气泡大小及分布的影响

面浆中气泡的存在及分布主要影响其产品的质构和口感等^[5]。面浆气泡大小及分布的均匀性如图3所示，加入不同种类氨基酸后对面浆气泡大小比例及分布的均匀性有不同程度的影响，但气泡直径都基本处于6~24 μm之间。



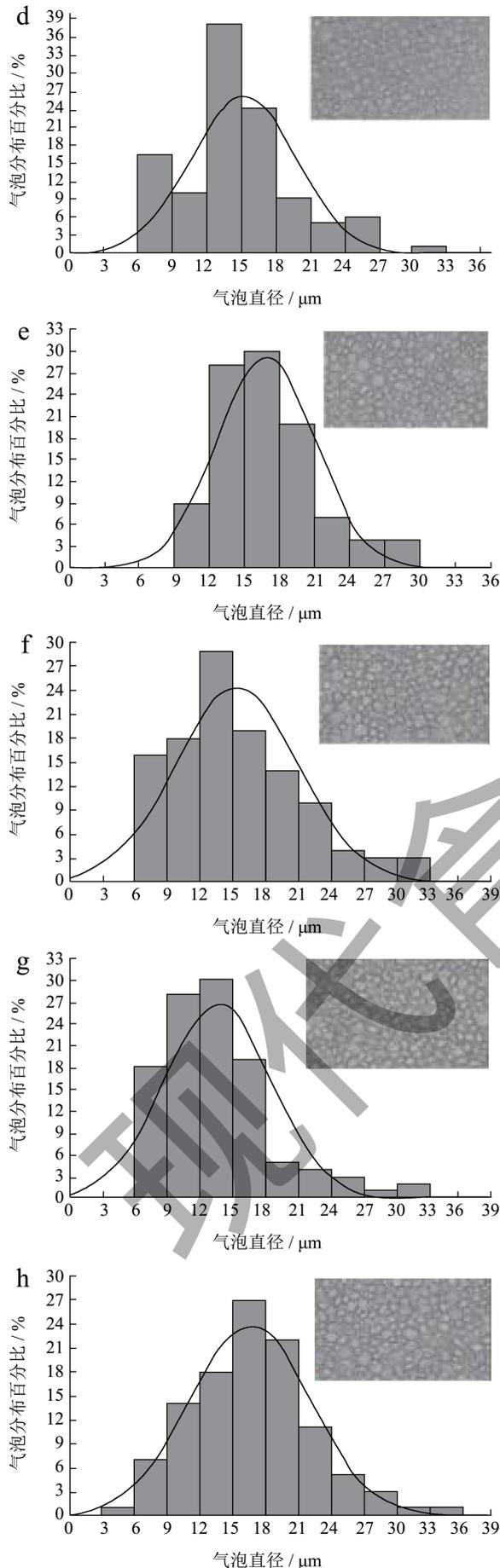


图3 不同种类氨基酸添加比例对面浆气泡大小及分布的影响
 Fig.3 Effect of different amino acid addition ratios on the size and distribution of the batter

注: (a) 空白对照; (b) 1% Arg; (c) 1% Lys; (d) 1% Glu; (e) 1% Asp; (f) 1% Trp; (g) 1% Met; (h) 1% Thr; (i) 1% Gly。

对照组 (添加 0% 氨基酸) 与加入 1% Arg 的面浆气泡大小及分布较为均匀, 但对照组直径处于 15~21 μm 的气泡占多数, 加入 1% Arg 直径则处于 6~18 μm 的气泡占多数, 因此与对照组相比, 加入 1% Arg 的面浆气泡分布更为均匀。加入 1% Lys 的面浆气泡分布相对不均匀, 气泡直径在 6~9 μm 之间的比例较高, 约占气泡总比例的一半, 小气泡的增多可以会影响面浆粘度的变化, 进而影响面浆在后续春卷产品应用中的品质, 导致其在制作春卷皮过程中气泡的增多, 影响春卷油炸时水分散失和油脂进入的速率。

加入 1% Glu 的面浆气泡直径多分布在 12~18 μm 之间, 加入 1% Asp 的面浆气泡直径在 12~21 μm 之间的占多数。而加入 Trp 和 Met 的面浆气泡分布情况较相似, 气泡直径均在 6~18 μm 之间分布较多。加入 Thr 和 Gly 的面浆气泡分布情况相似, 直径在 9~21 μm 之间的气泡占多数。

因此, Arg 的加入使面浆中的气泡呈现出连续性, 使面浆体系连接更紧密, 对后续产品的生产具有积极的影响。

2.4 不同种类氨基酸添加比例对面浆热力学特性的影响

面浆是一种复杂的体系, 在热加工过程中会发生淀粉糊化和蛋白质变性等一系列变化, 这些变化对面浆体系的热力学特性产生一定影响^[28]。

表 1 不同种类氨基酸添加比例对面浆热力学性质的影响
Table 1 Effect of different amino acid addition ratios on thermal properties of the batter

带电荷的氨基酸 (碱性和酸性氨基酸)				不带电荷的氨基酸 (非极性和中性氨基酸)							
氨基酸种类	添加量/%	起始温度(T_0)/°C	峰值温度(T_p)/°C	终止温度(T_f)/°C	焓 ΔH /(J/g)	氨基酸种类	添加量/%	起始温度(T_0)/°C	峰值温度(T_p)/°C	终止温度(T_f)/°C	焓 ΔH /(J/g)
Arg	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^{ab}	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^a	Trp	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^a	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^b
	0.2	57.23 ± 0.08 ^a	65.21 ± 0.04 ^b	71.32 ± 0.43 ^a	1.65 ± 0.04 ^b		0.2	55.92 ± 0.88 ^a	64.05 ± 0.01 ^c	71.31 ± 0.30 ^a	1.89 ± 0.08 ^a
	0.4	57.01 ± 1.32 ^a	64.59 ± 0.05 ^a	70.66 ± 0.66 ^a	1.51 ± 0.02 ^c		0.4	56.07 ± 0.66 ^a	64.38 ± 0.07 ^{bc}	70.89 ± 0.01 ^{ab}	1.79 ± 0.03 ^{ab}
	0.6	58.38 ± 0.80 ^a	65.05 ± 0.21 ^b	70.85 ± 0.35 ^a	1.32 ± 0.02 ^d		0.6	57.79 ± 0.59 ^a	64.17 ± 0.20 ^{bc}	70.48 ± 0.59 ^{ab}	1.45 ± 0.04 ^c
	0.8	58.39 ± 0.64 ^a	64.92 ± 0.10 ^{ab}	70.49 ± 0.13 ^a	1.33 ± 0.04 ^d		0.8	57.25 ± 0.52 ^a	64.50 ± 0.36 ^{ab}	70.09 ± 0.13 ^{bc}	1.31 ± 0.09 ^c
	1.0	58.35 ± 0.28 ^a	64.89 ± 0.30 ^{ab}	69.99 ± 0.74 ^a	1.24 ± 0.05 ^d		1.0	56.43 ± 0.38 ^a	63.35 ± 0.04 ^d	69.27 ± 0.26 ^c	1.34 ± 0.03 ^c
Lys	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^a	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^a	Met	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^a	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^a
	0.2	56.90 ± 0.47 ^a	65.20 ± 0.10 ^{ab}	73.73 ± 0.37 ^{ab}	2.00 ± 0.01 ^b		0.2	57.34 ± 1.16 ^a	64.82 ± 0.42 ^a	71.22 ± 0.36 ^a	1.52 ± 0.10 ^{ab}
	0.4	56.54 ± 0.56 ^a	65.25 ± 0.26 ^{ab}	72.97 ± 1.70 ^{ab}	2.05 ± 0.12 ^b		0.4	59.03 ± 0.40 ^{ab}	65.00 ± 0.04 ^a	69.55 ± 0.71 ^{ab}	0.96 ± 0.02 ^c
	0.6	56.85 ± 1.32 ^a	65.65 ± 0.13 ^b	74.33 ± 1.03 ^b	2.03 ± 0.17 ^b		0.6	60.02 ± 0.36 ^b	64.68 ± 0.20 ^a	69.17 ± 0.11 ^b	0.93 ± 0.15 ^c
	0.8	55.68 ± 0.01 ^a	65.54 ± 0.37 ^b	74.43 ± 0.75 ^b	2.05 ± 0.01 ^b		0.8	60.03 ± 0.89 ^b	64.77 ± 0.13 ^a	69.42 ± 0.90 ^{ab}	0.97 ± 0.26 ^c
	1.0	58.17 ± 1.52 ^a	65.62 ± 0.01 ^b	74.40 ± 0.64 ^b	1.99 ± 0.04 ^b		1.0	59.11 ± 0.60 ^{ab}	64.82 ± 0.11 ^a	70.32 ± 1.05 ^{ab}	1.19 ± 0.29 ^{bc}
Glu	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^a	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^a	Thr	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^a	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^a
	0.2	56.67 ± 0.51 ^a	65.36 ± 0.03 ^a	74.18 ± 0.76 ^b	2.10 ± 0.15 ^b		0.2	57.95 ± 0.13 ^a	65.06 ± 0.18 ^a	70.32 ± 0.01 ^b	1.22 ± 0.07 ^c
	0.4	57.58 ± 0.01 ^a	65.28 ± 0.32 ^a	73.78 ± 0.73 ^b	2.02 ± 0.09 ^{ab}		0.4	58.59 ± 0.13 ^a	65.07 ± 0.12 ^a	71.04 ± 0.13 ^b	1.46 ± 0.03 ^b
	0.6	57.09 ± 0.21 ^a	65.07 ± 0.64 ^a	73.99 ± 0.95 ^b	1.89 ± 0.10 ^{ab}		0.6	59.61 ± 0.29 ^a	65.10 ± 0.14 ^a	70.85 ± 0.44 ^b	1.27 ± 0.04 ^c
	0.8	55.68 ± 0.01 ^a	65.69 ± 0.30 ^a	73.46 ± 0.48 ^{ab}	1.89 ± 0.06 ^{ab}		0.8	59.06 ± 0.11 ^a	65.14 ± 0.14 ^a	71.09 ± 0.06 ^b	1.44 ± 0.06 ^b
	1.0	57.68 ± 1.90 ^a	65.64 ± 0.07 ^a	72.33 ± 1.32 ^{ab}	1.64 ± 0.28 ^a		1.0	58.64 ± 0.32 ^a	65.03 ± 0.14 ^a	71.27 ± 0.32 ^b	1.51 ± 0.01 ^b
Asp	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^a	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^a	Gly	0.0	57.04 ± 1.00 ^a	64.92 ± 0.07 ^a	71.27 ± 0.58 ^a	1.68 ± 0.11 ^a
	0.2	56.50 ± 0.50 ^a	65.68 ± 0.26 ^a	73.61 ± 0.46 ^a	1.80 ± 0.13 ^a		0.2	58.15 ± 0.73 ^{ab}	65.06 ± 0.26 ^a	70.96 ± 0.59 ^b	1.38 ± 0.02 ^b
	0.4	57.56 ± 0.27 ^a	65.25 ± 0.14 ^a	72.09 ± 0.67 ^a	1.69 ± 0.12 ^a		0.4	58.07 ± 0.36 ^{ab}	65.21 ± 0.18 ^b	70.47 ± 0.03 ^a	1.27 ± 0.01 ^c
	0.6	58.46 ± 0.01 ^a	65.63 ± 0.72 ^a	74.32 ± 0.30 ^a	1.87 ± 0.38 ^a		0.6	57.79 ± 0.13 ^{ab}	65.23 ± 0.22 ^b	71.29 ± 0.21 ^c	1.46 ± 0.04 ^b
	0.8	55.62 ± 2.19 ^a	65.44 ± 0.06 ^a	73.42 ± 1.46 ^a	2.08 ± 0.29 ^a		0.8	58.84 ± 1.13 ^b	65.29 ± 0.15 ^b	71.35 ± 0.56 ^c	1.43 ± 0.03 ^b
	1.0	56.91 ± 0.37 ^a	65.03 ± 0.03 ^a	72.64 ± 0.01 ^a	1.95 ± 0.04 ^a		1.0	57.93 ± 0.13 ^{ab}	65.30 ± 0.11 ^b	70.90 ± 0.07 ^b	1.35 ± 0.05 ^{bc}

注: 同种氨基酸一行中的不同上标字母表示参数间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

由表 1 可知, 与未添加任何氨基酸的空白样品相比, 加入氨基酸后, 面浆热力学特性随着加入的氨基酸种类的不同发生不同的变化。碱性和酸性氨基酸对面浆中淀粉糊化温度的变化较为明显, 其中加入 Glu 与 Asp 两种酸性氨基酸后, 其峰值温度 (T_p) 和终止温度 (T_c) 都有不同程度的升高, 其中峰值温度从 64.92 °C (添加 0.0% 氨基酸) 分别升高到 65.69 °C (添加 0.8% Glu)、65.63 °C (添加 0.6% Asp), 终止温度从 71.27 °C (添加 0.0% 氨基酸) 增大到 74.18 °C (添加 0.2% Glu)、74.32 °C (添加 0.6% Asp)。这可能是因为氨基酸所带电荷与面浆中淀粉之间发生弱的静电作用^[29], 并且酸性环境会加速淀粉中直链淀粉的浸出, 降低淀粉中直链淀粉的含量, 并且优先攻击淀粉中的非晶态区域, 因此, 经过酸处理的淀粉在较高的温度下糊化^[30]。并且加入 Glu 与 Asp 后其面浆糊化焓值有所增大, 因此会导致淀粉糊化所需能量变大。但加入 Arg 和 Lys 两种碱性氨基酸的结果不同, 其中加入 Lys 后, 其 T_c 和糊化焓值 (ΔH) 都有所升高; 而加入 Arg 后, 其 T_c 和 ΔH 都有所降低, 这可能是由于 Arg 的侧链基团带有一个胍基基团, 胍基化合物一般具有强碱性且在较大范围内保持正电性, 易与带负电的粒子形成强的两性离子氢键, 从而破坏了带负电的淀粉颗粒结构, 使糊化温度降低^[31]。这与陈文婷^[32]的研究结果相符。

加入 Trp 与 Met 两种非极性氨基酸的峰值温度都有所降低, 而加入 Thr 与 Gly 两种中性氨基酸的峰值温度有所升高, 但加入 Met 与 Gly 后其峰值温度并无显著性变化。并且加入 Trp、Met、Thr 和 Gly 后其面浆糊化焓值有所降低, 从 1.68 J/g (添加 0.0% 氨基酸) 分别降低到 1.31 J/g (添加 0.8% Trp)、0.93 J/g (添加 0.6% Met)、1.22 J/g (添加 0.2% Thr)、1.27 J/g (添加 0.4% Gly), 这可能是由于氨基酸含有氨基和羧基, 具有两亲性, 可与淀粉的羟基相互作用, 改变环境 pH 值, 影响淀粉的糊化性能^[33], 而不同氨基酸中含有羟基和羧基等活性基团的数量不同, 与淀粉羟基以及水分子间氢键发生的相互作用不同, 导致糊化过程中所需能量也有不同。

总的来说, 带电荷的氨基酸对面浆热力学特性影响较为明显, 可能是由于带电荷的氨基酸溶于水呈酸性, 改变了体系的 pH 值, 并且环境中的 H^+ 和 OH^- 离子会攻击面浆体系中淀粉颗粒的非晶态区域, 使淀粉颗粒的双螺旋结构发生变化^[30,32], 从而影响淀粉糊化等反应所需能量的变化。

2.5 不同种类氨基酸添加比例对面筋蛋白二级结构的影响

面筋蛋白的质量及其空间构象的形成与稳定影响着面制品的加工特性及其品质^[34]。傅里叶变换红外光谱仪 (FT-IR) 表征面筋蛋白结构的结果如图 4 所示, 面筋蛋白二级结构以 β - 折叠为主, 这与桂俊等^[19]研究结果一致。本实验中对照组 (添加 0.0% 氨基酸) 面筋蛋白的 β - 折叠、 α - 螺旋、无规卷曲和 β - 转角的含量分别为 45.55%、15.43%、17.29% 和 21.73%。而添加了不同种类外源性氨基酸的面筋蛋白二级结构发生了不同程度的变化, 其中添加 Arg 和 Lys 两种碱性氨基酸的面浆中面筋蛋白的 β - 折叠和 β - 转角结构含量增加, β - 折叠从 45.55% 分别增加到 46.21%、45.99%, β - 转角从 21.73% 分别增加到 21.88% 和 23.34%; 而 α - 螺旋和无规卷曲结构含量减少, 这与 Li 等^[35]研究结果相似, 这说明添加的 Arg 和 Lys 和蛋白质之间发生了一定程度的交联反应, 使面筋蛋白二级结构中的 α - 螺旋和无规则卷曲转变为了 β - 折叠、 β - 转角结构。此外, 在碱性环境下, 氢键顺序可能发生了变化, 从而导致面筋蛋白二级结构的变化。

添加 Glu 和 Asp 两种酸性氨基酸后, 面浆中 β - 折叠结构含量减少, 从 45.55% 分别减少到 43.55% 和 43.87%; α - 螺旋和无规卷曲结构含量增加, 其中, α - 螺旋结构含量从 17.29% 分别增加到 17.88% 和 18.61%, 无规卷曲含量从 15.43% 分别增加到 16.62% 和 16.00%。

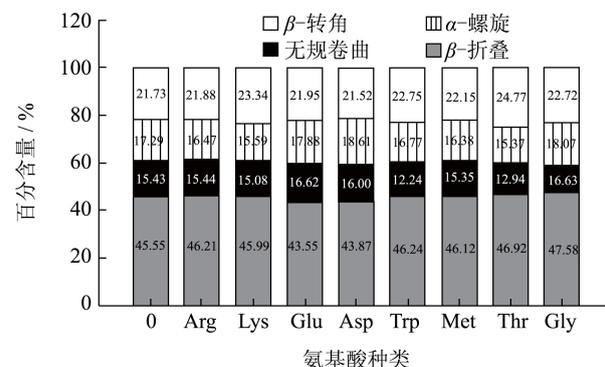


图 4 不同种类氨基酸添加比例对面浆面筋蛋白二级结构的影响

Fig.4 Effect of different amino acid addition ratios on secondary structures of gluten protein

注: 图中所有氨基酸添加比例均为 1.0% (以面浆总质量为 100% 计)。

添加了 Trp、Met、Thr 和 Gly 四种氨基酸的面筋蛋白二级结构变化趋势相似, 其中 β -折叠和 β -转角结构含量均增加, 无规卷曲含量都减少。因此, 不同种类氨基酸的添加会与面筋蛋白之间形成不同的交互作用, 从而影响着面筋蛋白二级结构的变化。而蛋白质结构的变化会导致面浆功能特性的变化, 其中碱性氨基酸 (Arg 和 Lys) 的添加使 β 型结构相对含量增加, 促进面筋蛋白空间构象刚性的增加^[36], 有利于提升面浆的面筋网络稳定性, 促进面浆的强度与稠度升高, 从而对春卷皮的品质特性产生积极影响。

2.6 不同种类氨基酸添加比例对面浆微观结构的影响

不同种类氨基酸添加比例的面浆激光共聚焦微观结构图如图 5 所示。空白对照组面浆的面筋网络结构较完整、结合较均匀, 呈连续的网格状。图中的阴暗部分为面筋网络孔隙, 添加部分氨基酸后面筋蛋白网络孔隙率减少, 说明部分氨基酸的添加对面筋网络结构具有强化作用。

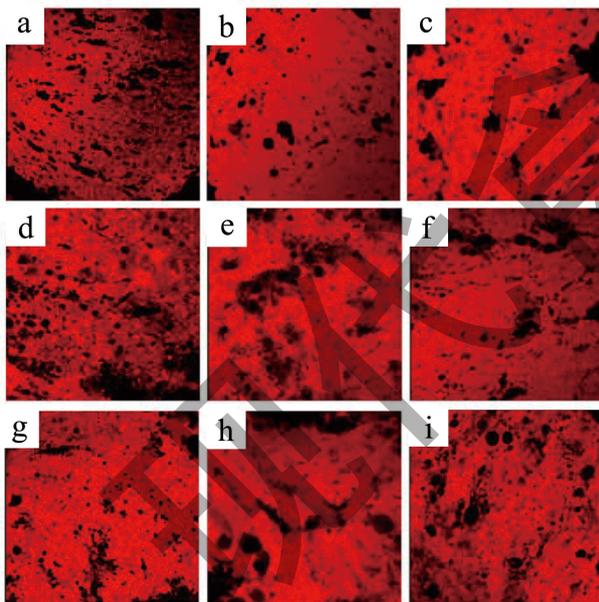


图 5 不同种类氨基酸添加比例面浆的激光共聚焦微观结构图
Fig.5 CLSM of the batter with different amino acid addition ratios

注: (a) 空白对照; (b) 1% Arg; (c) 1% Lys; (d) 1% Glu; (e) 1% Asp; (f) 1% Trp; (g) 1% Met; (h) 1% Thr; (i) 1% Gly。

加入 1% Arg 后, 面浆面筋网络结构变得紧密, 孔隙数量减少而网络孔隙的孔径大小增大, 其结构不均匀; 加入 1% Lys 后, 面浆所形成的面筋网络结

构部分网络孔隙的孔径增大, 其结构粗糙且不均匀; 加入 1% Glu、1% Asp 和 1% Trp 的面浆面筋网络结构较为粗糙, 其中添加 1% Asp 和 1% Trp 后, 面筋网络结构孔隙率有所减少但其部分网络孔隙孔径增大; 添加 1% Met 后使其网络孔隙的孔径明显减小, 结构更加紧密; 加入 1% Thr 和 Gly 的面浆面筋网络结构较不均匀。总体来说, 氨基酸的加入不同程度的改变了面浆面筋网络结构的连续性, 而部分氨基酸的加入使面浆的面筋网络孔隙减少, 结构连接更紧密。

3 结论

不同种类外源氨基酸的添加对面浆体系产生了一定的影响。碱性和酸性氨基酸的加入增加了面浆粘度, 降低了面浆析水率, 使面浆体系中游离水含量减少, 同时使面浆的蛋白面筋网络结构强度增加, 面浆体系连接更紧密。Lys、Glu 和 Asp 三种带电荷的氨基酸提高了面浆热力学特性中 T_p 和 T_c , 面浆中淀粉糊化所需能量增加。中性和非极性氨基酸的加入降低了面浆的粘度, 提高了面浆析水率, 但对面浆热力学特性影响较小; 增加了面筋蛋白二级结构中 β -折叠和 β -转角结构含量, 减少了无规卷曲含量, 面筋网络结构连接紧密但不均匀。本研究结果为理解氨基酸在面制品中的应用提供了相关理论参考。

参考文献

- [1] SALEH M. Wheat batter physical properties as influenced by starch/flour types and egg contents [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(2): 800-807.
- [2] SUROJANAMETAKUL V, KARNASUTA S, SATMALEE P. Effect of oil type and batter ingredients on the properties of deep-frying flakes [J]. Food Science and Technology, 2020, 40: 592-596.
- [3] CHO E, KIM J E, BAIK B K, et al. Influence of physicochemical characteristics of flour on pancake quality attributes [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(3): 1349-1359.
- [4] YANG X Y, PAN Y J, LI S N, et al. Effects of amylose and amylopectin molecular structures on rheological, thermal and textural properties of soft cake batters [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107980.
- [5] 阮征, 李赛, 李旭涵, 等. 青稞粉粒径及其高添加量对戚风蛋糕面糊特性和品质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 205-216.
- [6] BURBANO J J, CABEZAS D M, CORREA M J. Effect of walnut flour addition on rheological, thermal and microstructural properties of a gluten free-batter [J]. LWT-

- Food Science and Technology, 2022, 154: 112819.
- [7] CENGIZ E, DOGAN M. Effect of corn starch-hydrocolloid interactions on the rheological properties of coating batters [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): 15250.
- [8] GIRARD A, AWIKA J. Impact of condensed tannin interactions with grain proteins and non-starch polysaccharides on batter system properties [J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129969.
- [9] 戴一朋,章海风,凌晓冬,等.甲基纤维素对面糊流变性能及油炸挂糊肉片油脂渗透的影响[J].食品工业科技, 2021,42(22):79-85.
- [10] DARE O, JOSEPHINE A, MICHAEL N. Effect of ultrasound pretreated hydrocolloid batters on quality attributes of fried chicken nuggets during post-fry holding [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 91: 106237.
- [11] 潘燕.可溶性大豆多糖对面浆体系及冻藏条件下春卷皮品质的影响[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [12] RENZETTI S, VAN Der Sman R G M. Food texture design in sugar reduced cakes: Predicting batters rheology and physical properties of cakes from physicochemical principles [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107795.
- [13] LI P, HE W, WU G. Composition of amino acids in foodstuffs for humans and animals [J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 2021, 1332: 189-210.
- [14] KOH B K, LEE G C, LIM S T. Effect of amino acids and peptides on mixing and frozen dough properties of wheat flour [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(6): 359-364.
- [15] 潘燕,钟昔阳,罗水忠,等.可溶性大豆多糖对春卷皮冻融循环过程中品质变化的影响[J].食品科学,2022,43(8):59-65.
- [16] ABDEL-AAL E M, RABALSKI I, HERNANDEZ M, et al. Effect of sodium chloride, sucrose, and xanthan gum on pasting properties and gel syneresis of hairless canary seed starch [J]. Cereal Chemistry, 2019, 96: 908-919.
- [17] PYCIA K, JUSZCZAK L. The influence of the addition of nuts on the thermal and rheological properties of wheat flour [J]. Molecules, 2021, 26(13): 3969.
- [18] 吕一鸣,田潇凌,王晓曦,等.小麦蛋白质研究与开发现状[J].粮食加工,2022,47(3):8-13.
- [19] 桂俊,陆啟玉.阴离子对面条水分分布、蛋白二级结构和微观结构的影响[J].中国食品学报,2021,21(6):159-165.
- [20] LI H, MA J T, ZHAO B B, et al. Effect of tea polyphenols on the quality characteristics of fresh wheat noodles in the storage [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, 55(6): 2562-2569.
- [21] FEVZIOGLU M, OZTURK O Z, HAMAKER B R, et al. Quantitative approach to study secondary structure of proteins by FT-IR spectroscopy, using a model wheat gluten system [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2753-2760.
- [22] WANG YH, ZHANG QQ, GUO YY, et al. Effect of flour particle size on the qualities of semi-dried noodles and fine dried noodles [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(7): 15632.
- [23] TELCIAN A, CRISTEA D, SIMAI I. Formal concept analysis for amino acids classification and visualization [J]. Acta Universitatis Sapientiae, Informatica, 2020, 12(1): 22-38.
- [24] ZHOU C L, LI J, TAN S J, et al. Effects of l-arginine on physicochemical and sensory characteristics of pork sausage [J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2014, 6(5): 660-667.
- [25] WIDJAJASEPUTRA A I, HARIJONO, YUNIANITA, et al. Effect of flour to water ratio on characteristics of fresh rice-based *Spring Rolls Wrappers* [J]. Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan, 2011, 22(2): 184-189.
- [26] TAN H L, TAN T C, EASA A M. Effects of sodium chloride or salt substitutes on rheological properties and water-holding capacity of flour and hardness of noodles [J]. Food Structure, 2020, 26: 100154.
- [27] 许慧娴,朱芷仪,韦惠莹,等.氨基酸对淀粉结构形貌及热致相变行为的影响[J].现代食品科技,2022,38(2):128-142.
- [28] 胡瀚,王娅殊,周文化,等.紫薯粉对小麦面团加工特性影响的研究进展[J].食品与机械,2021,37(8):217-224.
- [29] CHEN Y, WANG Y, ZHANG X, et al. Retardant effect of different charge-carrying amino acids on the long-term retrogradation of normal corn starch gel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 1020-1028.
- [30] CHEN W, ZHOU H X, YANG H, et al. Effects of charge-carrying amino acids on the gelatinization and retrogradation properties of potato starch [J]. Food Chemistry, 2015, 167: 180-184.
- [31] 马天怡,张唯唯,何振东,等.碱性氨基酸改造食品蛋白质功能性研究进展[J].精细化工,2021,38(2):294-305.
- [32] 陈文婷.带电荷的氨基酸对马铃薯淀粉特性影响的研究[D].武汉:华中农业大学,2014.
- [33] LIANG Z L, CHEN X, LUO J W, et al. Addition of amino acids to modulate structural, physicochemical, and digestive properties of corn starch-amino acid complexes under hydrothermal treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 741-749.
- [34] LIU H, LIANG Y, CHEN Z L, et al. Effect of curdilan on the aggregation behavior of gluten protein in frozen cooked noodles during cooking [J]. Journal of Cereal Science, 2022, 103: 103395.
- [35] LI M, SUN Q J, HAN C W, et al. Comparative study of the quality characteristics of fresh noodles with regular salt and alkali and the underlying mechanisms [J]. Food Chemistry, 2018, 246: 335.
- [36] 宣以锋.羟丙基甲基纤维素(HPMC)对冷冻面团加工性质的影响及相关机制研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.