

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.05.015

紫甘蓝花色苷对鲜湿面条品质及其 淀粉消化特性的影响

谢莉^{1,2}, 刘凤茹^{1,2}, 刘明龙^{1,2}, 杨婷婷³, 叶永康¹, 郑志¹

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 皖南特色农产品加工技术研究与应用中心, 安徽 宣城 242000; 3. 南通市物资储备和粮油质量监管中心, 江苏 南通 226000)

摘要:为了探究天然活性成份的面团品质的相互关系,文章研究紫甘蓝花色苷(purple cabbage anthocyanins, PCA)对面团的粉质、拉伸品质以及面条的质构、蒸煮、消化特性的影响。研究发现:随着PCA的添加量增加到0.8%时,面团粉质、拉伸品质显著提升,稳定时间从5.20 min增加到6.53 min,弱化度从66.67 FU减少到56.33 FU;当醒发时间为45 min时,面团的拉伸曲线面积从82.67 cm²升高到105.67 cm²,拉伸阻力从408.67 BU提升到420.33 BU,延伸度从130.00 mm提高到147.33 mm。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)表征结果显示,PCA能够促进面筋交联,减少裂缝和孔隙。淀粉消化实验结果表明,PCA能够降低快消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)质量分数,增加慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)质量分数。研究表明,PCA通过影响面条的质构、微观结构及淀粉消化性能来改善面条的营养品质,该研究为功能性主食品质升级提供理论支撑。

关键词:紫甘蓝花色苷(PCA);面条;淀粉消化率;粉质特性;拉伸特性;蒸煮特性

中图分类号:TS213.2

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)05-0679-08

Effect of purple cabbage anthocyanins on fresh noodle properties and its starch digestive properties

XIE Li^{1,2}, LIU Fengru^{1,2}, LIU Minglong^{1,2}, YANG Tingting³, YE Yongkang¹, ZHENG Zhi¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. South Anhui Distinctive Agricultural Product Processing Technology Research and Application Center, Xuancheng 242000, China; 3. Nantong Material Reserve and Grain and Oil Supervision Center, Nantong 226000, China)

Abstract: This paper investigated the effects of purple cabbage anthocyanins(PCA) on the farinograph and extensograph properties of dough, as well as the texture, cooking and digestive properties of noodles, to explore the interrelationship between the natural active ingredients and the quality of dough. It was found that, with the addition of PCA increased to 0.8%, the farinograph and extensograph properties of dough were significantly improved, the stabilization time was increased from 5.20 min to 6.53 min, and the degree of weakening was reduced from 66.67 FU to 56.33 FU; when the rise time was 45 min, the area under the curve of dough was increased from 82.67 cm² to 105.67 cm², the tensile resistance was increased from 408.67 BU to 420.33 BU, and the elongation increased from 130.00 mm to 147.33 mm. Scanning electron microscope(SEM) observations showed that PCA was able to promote gluten cross-linking and reduce cracks and pores. Starch digestion experiments showed that PCA was able to decrease the rapidly digestible starch(RDS) content, increase the slowly digestible starch(SDS) and resistant starch(RS) content. In summary, PCA improved the nutritional quality of noodles by affecting

收稿日期:2024-03-15; **修回日期:**2024-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(32372243);安徽省自然科学基金资助项目(2308085MC109);合肥市关键共性技术研发资助项目(2021GJ073)和皖南特色农产品加工技术研究与应用中心专项基金资助项目(W2021JSFW0388)

作者简介:谢莉(1998—),女,江西赣州人,合肥工业大学硕士生;

刘凤茹(1984—),女,河北廊坊人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:liufengru@hfut.edu.cn;

郑志(1971—),男,安徽和县人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

their texture, microstructure and starch digestibility. This study provides theoretical support for the upgrading of the quality of functional staple foods.

Key words: purple cabbage anthocyanins(PCA); noodles; starch digestibility; farinograph properties; extensograph properties; cooking characteristics

0 引言

面条是很多国家的常见主食,因其蒸煮便捷、价格亲民而广受欢迎和喜爱。面条中含有大量的碳水化合物成分,这些成分在被摄入体内后能够被有效地转化为人体所需的能量形式,为身体提供源源不断的动力。但是普通面条中快消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)质量分数高,食用面条后血糖快速升高,为健康带来潜在威胁^[1]。近年来,2 型糖尿病患者和肥胖人数逐渐增加,据调查,在 2021 年,已经有 5.37 亿成年人患有糖尿病,这几年人数一直上涨,预计到 2045 年人数将达到 7.83 亿^[2]。世界卫生组织已将肥胖确定为世界人口中日益普遍的最严重的慢性疾病,据统计全球肥胖比例持续上升,人数已超过 2 亿^[3]。随着科技的不断进步和人们对健康饮食的日益关注,营养面条作为一种新型食品逐渐受到消费者的青睐。研究者们向面粉中加入酚类^[4]、藜麦粉^[5]、豆渣^[6]、车前草纤维^[7]、枸杞^[8]等用于降低淀粉消化和降低血糖指数,也有通过热-湿处理促进淀粉分子链迁移和重排,从而有助于形成慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)^[9]。

花色苷作为一种天然存在的类黄酮化合物,具有降低血糖浓度、对抗氧化应激和延缓细胞衰老等多种生物活性,因此花色苷被应用于食品工业、医学研究和化妆品制造等多个领域。花色苷能够降血糖主要有 2 个原因:① 花色苷能够与淀粉结合,改变淀粉的结构和性质;② α -淀粉酶是一种负责分解淀粉的酶,而花色苷的抑制作用可以降低该酶的活性,从而减缓淀粉的消化速度。这一过程不仅可以有效地控制血糖水平的升高,还有助于减少热量的摄入^[10]。有研究者将花色苷添加到面包中用于强化面包质量,可生产抗氧化能力强并且淀粉消化率低的功能性面包^[11-12]。据报道,高粱中的多酚能够作为抑制淀粉消化率的调节剂^[13],苹果中的多酚通过抑制水解酶活性降低淀粉消化率^[14]。

本文研究了紫甘蓝花色苷(purple cabbage anthocyanins, PCA)添加量与面条质构特性、蒸

煮特性和淀粉消化特性的相互关系。通过粉质仪、拉伸仪、质构仪、色差仪分析了面团的稳定性(面团形成时间、稳定时间、弱化度、吸水率、色泽、拉伸曲线面积、拉伸阻力、拉伸长度及拉伸比值)和面条的适口性(硬度、弹性、咀嚼性及内聚性)变化趋势,使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察 PCA 面条的微观结构演变过程,并分析了 PCA 对面条的蒸煮特性以及淀粉消化特性的调节作用,旨在为营养面条的开发以及花色苷在食品中的应用提供了更加充分的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

高筋小麦粉购于中粮集团有限公司;紫甘蓝花色苷购于西安瑞林生物科技有限公司; α -淀粉酶(4 000 U/g)购于上海麦克林生化科技有限公司;糖化酶(100 000 U/mL)购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司;氯化钠(NaCl)、冰醋酸、乙醇、醋酸钠均购于国药集团化学试剂有限公司。所有试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

本实验所用仪器与设备有:TA. XTC-18 质构仪(上海保圣实业发展有限公司);Farinograph-E 粉质仪(德国 Brabender 公司);Farinograph-E 拉伸仪(德国 Brabender 公司);YS6010 色差仪(深圳市三恩时科技有限公司);Regulus 8230 高分辨场发射扫描电子显微镜(日本 Hitachi 公司);SHA-B 恒温振荡器(常州智博瑞仪器制造有限公司);FKM-150 系列家用电动压面机(浙江俊媳妇厨具有限公司);HMJ-D3826 厨房机械和面机(小熊电器股份有限公司);C21-SN2105 多功能电磁炉(美的集团股份有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 面团的制备

向 100 g 面粉中分别添加质量分数为 0、0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.2% 的 PCA,将混合粉倒入和面机中,加入 45 mL 蒸馏水,和面 10 min,醒面 20 min,取 20 g 新鲜面团,进行 24 h 的冷冻干燥处理后以供后续实验使用。

1.3.2 色泽的测定

向压面机中放入刚刚制备的面团,将面团制成面片,切成 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ 大小的样品。将样品放在色差仪上进行颜色测定,记录样品的亮度值 L 、红绿值 a 、黄蓝值 b ,依据下列公式计算面片的白度 V_w :

$$V_w = 100 - [(100 - L)^2 + a^2 + b^2]^{1/2} \quad (1)$$

1.3.3 粉质特性的测定

参考文献[15]的研究方法,称取 300 g 混合粉放入揉面钵中,先预搅拌 2 min ,再逐渐加水使得粉质曲线在 $480 \sim 520\text{ FU}$ 范围。测试完成后计算吸水率、面团发育时间、稳定时间、弱化度。

1.3.4 拉伸特性的测定

参考文献[16]的研究方法,首先在粉质仪中制备含有 2% 氯化钠的面团,制备完毕后,再采用高精度的拉伸仪测定面团在醒面 45 、 90 、 135 min 后的拉伸特性(拉伸面积、拉伸阻力、拉伸长度、拉伸比值)。

1.3.5 面团微观结构

将冷冻干燥后的面团样品自然掰开获取横截面[17],将样品放置在导电胶上,并且选择结构清晰的一面朝上用于观察。将样品先喷金 120 s 后放入高分辨 SEM 观察其微观结构。图像放大倍数为 500 倍。

1.3.6 面条的制备

向 100 g 面粉中分别添加质量分数为 0 、 0.1% 、 0.2% 、 0.4% 、 0.8% 、 1.2% 的 PCA,向和面机中倒入混合粉,加入 45 mL 蒸馏水,和面 10 min ,醒面 20 min ;随后将面团放入压面机中,选择 7 档压制厚度为 2.5 mm 的面片,并用粗切面刀制备面条。

1.3.7 蒸煮特性的测定

依据前人的方法[8],取 10 根面条放入沸水浴中煮 5 min ,捞出面条沥干后称其质量,收集煮面水并且烘干至恒重;取少量煮熟的面条冷冻干燥 24 h ,研磨后过 80 目筛。按照下列公式计算面条的蒸煮产率和蒸煮损失率:

$$A_1 = (m_2/m_1) \times 100\% \quad (2)$$

$$A_2 = (m_3/m_4) \times 100\% \quad (3)$$

其中: A_1 为蒸煮产率; A_2 为蒸煮损失率; m_1 为鲜面质量; m_2 为沥干水后熟面质量; m_3 为干燥后面汤质量; m_4 为生面干质量。

1.3.8 质构特性的测定

对文献[18]的研究方法稍作修改,将煮好的面条沥干水后放在质构仪平台上测定面条的质构

特性。实验具体参数如下:轻质切刀 TA/LKB 探头,测试前速度 1.0 mm/s ,测试速度 0.8 mm/s ,测试后速度 1.0 mm/s ,形变量为 30% 。

1.3.9 淀粉消化特性的测定

面条的消化特性测定方法根据文献[6]方法稍作修改。将冷冻干燥后的熟面条研磨成粉末后过 80 目筛子。称取少量粉末(100 mg 干淀粉基),并分散在 30 mL 的 0.1 mol/L 醋酸钠缓冲液(pH 值为 5.2)中;然后在摇床上设置 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 下 150 r/min 的转速进行恒温震荡反应 10 min ;混合物中加入了 2.25 mL 的混合酶溶液,其中包含 α -淀粉酶(300 U/mL)和糖化酶(30 U/mL);在 0 、 20 、 30 、 60 、 90 、 120 、 180 min 时分别取出 $200\text{ }\mu\text{L}$ 的溶液样本,然后向每个取出的样品中加入了 $800\text{ }\mu\text{L}$ 的无水乙醇停止酶的活性;将这 1 mL 的溶液进行离心处理,离心机转速为 5000 r/min ,离心时间为 3 min 。采用 DNS 法测定样品中的葡萄糖质量分数,在 540 nm 处测定溶液的吸光度值。RDS、SDS 和 RS 的质量分数按以下公式计算:

$$B = \frac{0.9G_h}{S_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$B_{\text{RDS}} = \frac{0.9G_{20}}{S_0} \times 100\% \quad (5)$$

$$B_{\text{SDS}} = \frac{0.9(G_{120} - G_{20})}{S_0} \times 100\% \quad (6)$$

$$B_{\text{RS}} = \frac{S_0 - B_{\text{RDS}} - B_{\text{SDS}}}{S_0} \times 100\% \quad (7)$$

其中: B 为淀粉水解率; B_{RDS} 、 B_{SDS} 、 B_{RS} 分别为 RDS、SDS、RS 质量分数; G_h 为水解产生的葡萄糖质量分数; S_1 为初始样品淀粉质量分数; G_{20} 为 20 min 后的葡萄糖质量分数; G_{120} 为 120 min 后的葡萄糖质量分数; S_0 为面条的总淀粉质量分数。

以淀粉消化曲线下面积计算葡萄糖释放量,水解指数 H 和预测血糖生成指数 G 的计算公式[19]为:

$$H = \frac{C_1}{C_0}, \quad G = 39.71 + 0.549H \quad (8)$$

其中: C_1 表示样品淀粉消化曲线下面积; C_0 表示白面包淀粉消化曲线下面积。

1.3.10 数据处理

每组进行 3 次平行实验。选用 IBM SPSS Statistics 26.0 统计软件来进行数据处理。采用单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 检验,其中设定的显著性水平为 $P < 0.05$,不同小写字母表示存在显著性差异。计算结果以平均值 $\pm$ 标准差

表示。使用 Origin 2021 软件绘制相关图,并用 Adobe Photoshop 2021 进行图像整体组合处理。

2 结果与分析

2.1 PCA 对面团颜色的影响

面条的颜色是一项重要的感官特性,能够直接影响人们对其的感知和选择^[20]。本文采用色差仪对不同添加量的 PCA 面团进行精确的色泽测定,面团色泽的变化情况见表 1 所列。

从表 1 可以看出,PCA 能够导致 L 值(亮度)、 V_w 值(白度)以及 b 值(黄蓝值)显著降低, a

值(红绿值)显著增加。相对于未添加 PCA 的面团,添加了 0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.2% PCA 的面团 L 值分别降低了 6.22、10.82、17.12、23.32、30.14; a 值分别增加了 1.57、2.88、4.48、6.38、7.85; b 值分别降低了 5.28、7.63、10.20、12.19、14.51; V_w 值分别降低了 1.08、4.25、9.67、15.67、22.39。随着 PCA 添加量的增加,面团颜色从淡黄色转变为浅紫色再到深紫色,这是由于 PCA 是深紫色粉末,添加到面团中可显著改变其色泽。添加了花色苷的玉米饼颜色也出现了相似的变化趋势^[21]。

表 1 PCA 对面团颜色的影响

PCA 添加量/%	L	a	b	V_w
0	(87.39±0.45) ^a	(0.63±0.01) ^f	(17.11±0.66) ^a	(78.73±0.73) ^a
0.1	(81.17±0.26) ^b	(2.20±0.01) ^e	(11.83±0.12) ^b	(77.65±0.28) ^a
0.2	(76.57±0.89) ^c	(3.51±0.05) ^d	(9.48±0.11) ^c	(74.48±0.85) ^b
0.4	(70.27±0.20) ^d	(5.11±0.08) ^c	(6.91±0.04) ^d	(69.06±0.21) ^c
0.8	(64.07±0.43) ^e	(7.01±0.12) ^b	(4.92±0.11) ^e	(63.06±0.42) ^d
1.2	(57.25±1.20) ^f	(8.48±0.06) ^a	(2.60±0.08) ^f	(56.34±1.18) ^e

2.2 PCA 对面团粉质特性的影响

面粉特性对面团在加工过程中的流变特性和面筋的强度都至关重要^[22]。面团的稳定时间越长和弱化度越低表明面筋强度越强,在和面过程中更加稳定^[23]。PCA 对面团粉质特性的影响见表 2 所列。从表 2 可以看出,PCA 添加量对面团粉质特性具有调控作用。PCA 添加量从 0 增加到 1.2% 时,面团形成时间从 4.30 min 降至 1.73 min,稳定时间从 5.20 min 增至 8.30 min,弱化度从 66.67 FU 降至 44.00 FU,吸水率从 65.30% 降至 62.87%。PCA 具有多羟基结构,在

和面过程中能够优先结合面筋蛋白,形成 PCA-蛋白复合物,这可能会阻止淀粉与水接触,从而造成吸水率的降低^[24]。在面团中加入茶多酚也发现了相似的结果^[25]。面团形成时间反映了面粉与水混合过程中面筋网络形成的时间,PCA 的添加能够促进面筋网状结构的形成,缩减形成时间。稳定时间增长,弱化度降低,说明 PCA 能够提升面筋筋力。据报道,米糠中的多酚通过与面筋蛋白的氨基酸残基交联而提升面团品质^[26]。因此,添加适量 PCA 能够改善面团粉质特性,从而提高面条加工性能。

表 2 PCA 对面团粉质特性的影响

PCA 添加量/%	面团形成时间/min	稳定时间/min	弱化度/FU	吸水率/%
0	(4.30±0.10) ^a	(5.20±0.10) ^d	(66.67±0.58) ^a	(65.30±0.10) ^a
0.1	(4.23±0.06) ^a	(5.23±0.06) ^d	(66.00±1.73) ^{ab}	(65.10±0.10) ^a
0.2	(3.83±0.06) ^b	(5.43±0.06) ^{cd}	(63.33±0.58) ^b	(64.70±0.10) ^b
0.4	(3.63±0.06) ^c	(5.70±0.20) ^c	(60.00±1.00) ^c	(64.33±0.21) ^c
0.8	(3.60±0.10) ^c	(6.53±0.32) ^b	(56.33±1.53) ^d	(63.10±0.10) ^d
1.2	(1.73±0.06) ^d	(8.30±0.10) ^a	(44.00±2.65) ^e	(62.87±0.15) ^d

2.3 PCA 对面团拉伸特性的影响

PCA 对面团拉伸特性的影响如图 1 所示。

从图 1 可以看出,对于相同 PCA 添加量的面团,随着醒发时间的延长,拉伸曲线面积、拉伸阻力以及拉伸比例增加,面团的延伸度却随着醒发时间延长而降低。对于加入不同质量

分数 PCA 的面团,醒发时间为 45 min 时,拉伸曲线面积从 88.00 cm² 增加到 120.67 cm²,拉伸阻力从 420.33 BU 增加到 469.67 BU,延伸度从 124.67 mm 增加到 154.00 mm;当醒发时间为 90 min 时,延伸度随着 PCA 添加量增多呈现先增加后降低的趋势。面筋的筋力增强,

抗拉伸性质提升,加工性能变好,表现为拉伸曲线面积增大,拉伸阻力增加。

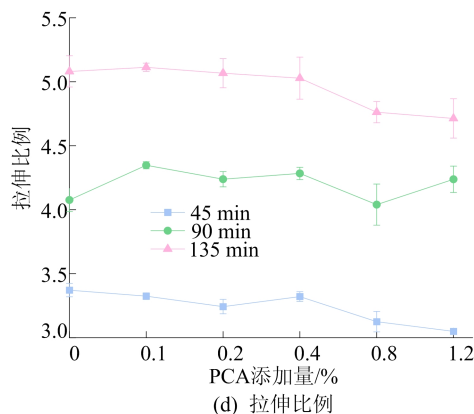
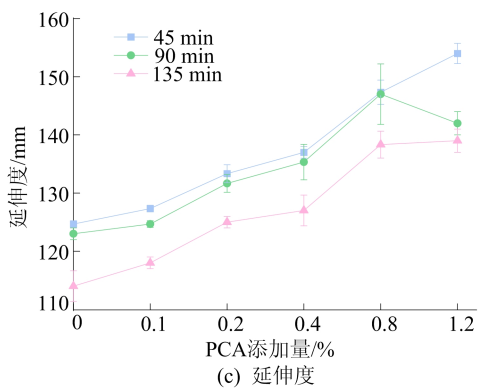
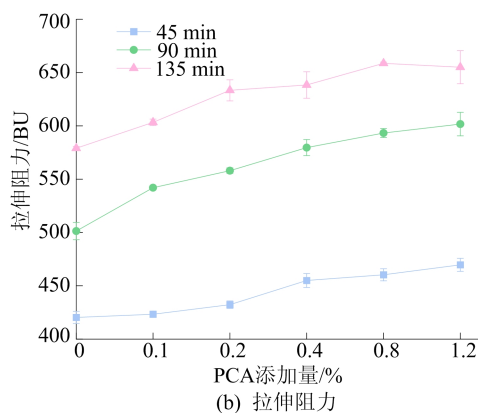
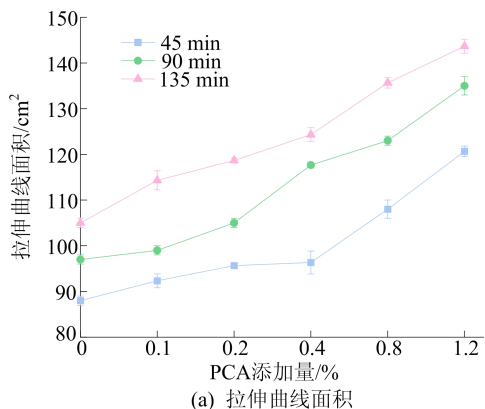


图1 PCA对面团拉伸特性的影响

因此 PCA 能够促进面筋蛋白交联,对面筋网络起到加固效果,从而优化拉伸特性。文献[27]研究发现,茶多酚能够与面筋蛋白发生相互作用,增加面筋强度,提高拉伸性能。拉伸实验表明,适量 PCA 能够对面团品质产生积极影响,提升其整体品质,但大量添加并不利于改善面条加工性能。

2.4 PCA 对面团微观结构的影响

添加不同质量分数 PCA 的面团的 SEM 图如图 2 所示。

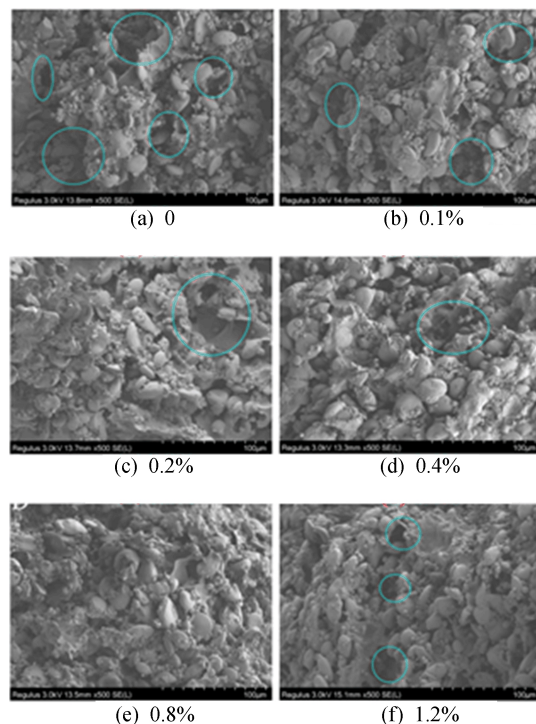


图2 冷冻干燥面团的 SEM 图

从图 2 可以看出:未添加 PCA 面团(图 2a)的面筋网络松散无序,可见较多、较大孔隙和裂缝;PCA 添加量为 0.1%、0.2%、0.4%、0.8% 的面团(图 2b~图 2e)裂缝逐渐减少,孔隙变小,这说明少量 PCA 能够促进面筋网络的形成,对面团品质起到提升作用,多酚的多羟基结构可能会影响蛋白间原有的氢键,通过非共价相互作用促进面筋交联,使面筋链形成网络结构[28];当 PCA 添加量达到 1.2% 时(图 2f),面筋网络基质已经不连续,出现大裂缝,这可能是由于大量 PCA 的还原性将二硫键还原为游离巯基的破坏作用占主导,造成面筋结构不稳定。据报道,当花色苷添加量为 10% 时,淀粉颗粒大量暴露,面筋无法形成连续的网状结构[24]。

2.5 PCA 对面条蒸煮特性的影响

面条的蒸煮特性对于面条品质高低有关键性

的影响^[29]。高质量的面条具有蒸煮产率高而蒸煮损失率低的特性^[30]。PCA 对面条蒸煮特性的影响见表 3 所列。

从表 3 可以看出,PCA 能够对面条的蒸煮特性产生显著性影响。添加微量 PCA(0.1%)时对蒸煮特性并没有显著性影响;当添加量为 0.2%、0.4%、0.8%时,蒸煮损失率低于未添加 PCA 的面条,这可能是由于 PCA 能够与面筋蛋白结合形成了更加致密的网络,从而减少了部分营养物质的损失;当添加过量 PCA(1.2%)时,面筋网络被

破坏,淀粉颗粒无法牢固附着在网络上,从而在蒸煮过程中更容易逸散入面汤中。有研究表明,枸杞中富含的多酚类物质具有强大的抗氧化特性,能够与面筋蛋白结合,形成更为紧密的网络结构,这种交联作用可以增强面团的韧性和稳定性,显著降低面条在烹煮过程中的破损率,进而提高面条的口感和品质^[8]。文献^[31]研究表明,膳食纤维通过诱导形成更加紧密的面筋结构,可改善糊化特性,从而降低蒸煮损失。因此,适量 PCA 能够改善面条品质,减少营养损失。

表 3 PCA 对面条蒸煮特性和预测血糖生成指数的影响

PCA 添加量/%	蒸煮产率/%	蒸煮损失率/%	预测血糖生成指数
0	(147.42±1.01) ^c	(10.40±0.07) ^b	(81.34±0.14) ^a
0.1	(149.79±0.86) ^{bc}	(10.25±0.05) ^b	(80.26±0.01) ^b
0.2	(150.74±0.36) ^{ab}	(8.90±0.08) ^c	(79.22±0.11) ^c
0.4	(152.54±0.88) ^{ab}	(7.77±0.11) ^d	(77.77±0.05) ^d
0.8	(150.70±2.91) ^{ab}	(7.05±0.21) ^e	(76.59±0.07) ^e
1.2	(153.30±1.47) ^a	(11.25±0.62) ^a	(75.17±0.05) ^f

2.6 PCA 对面条质构特性的影响

面条的质构特性在面条的品质评价中具有重要意义^[8]。通过模拟人口腔咀嚼的过程,全质构实验能够剖析获取产品的各种质构特性参数。通过添加 PCA 改变面团成分和面筋蛋白结构,从而提升面条品质,PCA 对面条质构特性的影响见表 4 所列。由表 4 可知,随着 PCA 添加量的升高,面条的硬度和咀嚼性逐渐变大,而弹性和内聚性呈现先增加后减少的变化趋势。PCA 在添加量从 0 增加到 1.2%时面条的硬度从 32.77 增加

到了 37.39,咀嚼性从 14.48 增加到了 20.51。文献^[32]研究发现富含花色苷的黑米提取物能够显著增加面包的硬度和咀嚼性;葡萄籽中的活性物质也能够促进面条硬度增加,而对内聚性没有显著性影响^[33];面筋网络强弱能够对面条硬度、弹性、咀嚼性等造成显著影响^[28],这有可能是由于花色苷能够与面筋蛋白形成复合物,使得面条内部组织结构更为紧凑,造成硬度及咀嚼性增大。因此过多的 PCA 可能会对面筋网络的形成产生不利影响,导致面团的加工性能变差,造成弹性的减弱。

表 4 PCA 对面条质构特性的影响

PCA 添加量/%	硬度	弹性	咀嚼性	内聚性
0	(32.77±0.09) ^f	(0.79±0.01) ^c	(14.48±0.16) ^e	(0.54±0.01) ^b
0.1	(33.11±0.10) ^e	0.83 ^b	(14.87±0.04) ^d	(0.55±0.01) ^{ab}
0.2	(33.56±0.16) ^d	(0.84±0.01) ^{ab}	(15.20±0.16) ^c	(0.55±0.01) ^{ab}
0.4	(34.73±0.14) ^c	(0.86±0.01) ^a	(17.32±0.10) ^b	(0.56±0.01) ^a
0.8	(35.52±0.11) ^b	(0.78±0.03) ^c	(17.45±0.11) ^b	(0.56±0.01) ^a
1.2	(37.39±0.18) ^a	(0.74±0.02) ^d	(20.51±0.10) ^a	(0.53±0.02) ^b

2.7 PCA 对面条中淀粉消化特性的影响

PCA 对面条消化特性的影响如图 3 所示。从图 3a 可以看出,淀粉的消化速度一开始较快,随着水解进行消化速度减慢,与文献^[34]研究结果相似。当酶解时间为 180 min 时,未添加 PCA 面条的淀粉消化率为 74.56%,随着 PCA 添加量的增多,面条中淀粉消化率逐渐降低。为了进一步研究 PCA 对面条中淀粉消化率的影响,本文分

析 PCA 对体外消化血糖变化的影响,见表 3 所列,可以看出,PCA 能够降低面条的血糖生成指数,该结果与文献^[32]的研究结果相似。据报道,通过氢键与疏水作用力,矢车菊素-3-O-葡萄糖苷与 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的氨基酸残基结合,最终抑制酶活性^[35]。一方面花色苷可能与淀粉相结合形成耐酶解结构,另一方面通过降低酶活性,从而降低淀粉消化率。

由图 3b 可知,PCA 对 3 种淀粉所占比例起调控作用,它不仅能降低 RDS 质量分数,还能促进 RS 的生成与积累。酚类化合物具有独特的化学性质,能够与淀粉分子相互作用改变其结构,从而促进 RS 质量分数的增加^[13]。相对于未添加 PCA 的面条,添加了 0.1%、0.2%、0.4%、0.8%、1.2% PCA 的面条中 RDS 质量分数分别降低了 1.05%、2.69%、5.68%、7.50%、9.84%。SDS 均高于未添加 PCA 组,RS 质量分数随着花色苷添加量的增多而增多。

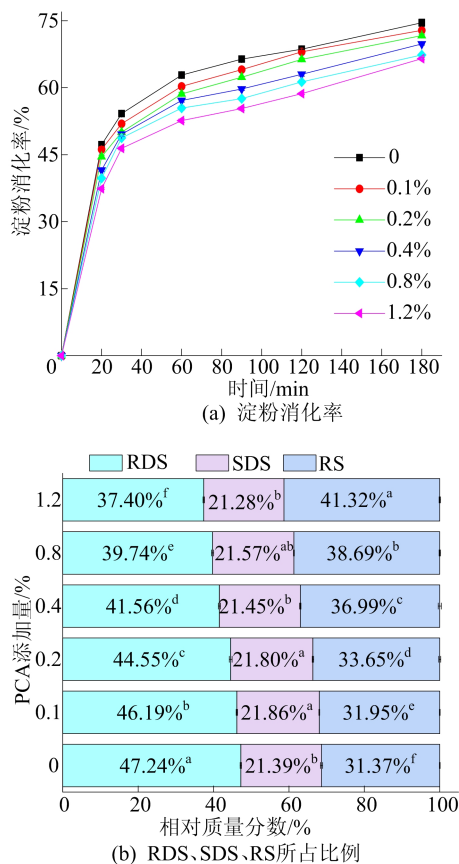


图 3 PCA 对面条中淀粉消化特性的影响

3 结 论

通过增强面筋之间的交联作用,PCA 促使面团形成更为致密且均匀的网状结构,从而提高了面条的弹性和韧性。这种结构的改善使得面条在煮制过程中能够更好地保持形状,减少破损。与未添加 PCA 的面团相比,添加了 PCA 的面团粉质特性得以改善,其稳定性显著增加,面团形成时间、弱化度、吸水率显著变低,拉伸面积、拉伸阻力、延伸度显著增加($P < 0.05$)。PCA 对面条的蒸煮特性也具有显著影响($P < 0.05$),能提高面

条的蒸煮产率、降低蒸煮损失率。PCA 还能够通过改变淀粉结构和抑制水解酶活性而降低淀粉消化率。研究表明,适量 PCA 能够改善面条特性,并且达到降血糖的效果,该研究为花色苷在食品中的应用提供了理论依据。

【参 考 文 献】

- [1] ZHU J, LIU Z, CHEN L, et al. Impact of protein network restructured with soy protein and transglutaminase on the structural and functional characteristics of whole-grain highland barley noodle [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107909.
- [2] ZHANG H, SUN S, AI L. Physical barrier effects of dietary fibers on lowering starch digestibility [J]. Current Opinion in Food Science, 2022, 48: 100940.
- [3] LI J, YIN L, CHEN S, et al. The perspectives of NETosis on the progression of obesity and obesity-related diseases: mechanisms and applications [J]. Frontiers in Cell and Developmental Biology, 2023, 11: 1221361.
- [4] MOSELE J I, MOTILVA M J, LUDWIG I A. Beta-glucan and phenolic compounds: their concentration and behavior during *in vitro* gastrointestinal digestion and colonic fermentation of different barley-based food products [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66 (34): 8966-8975.
- [5] ZHANG Y, MA Z, CAO H, et al. Effect of germinating quinoa flour on wheat noodle quality and changes in blood glucose [J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101809.
- [6] XIE L, ZHOU W, ZHAO L, et al. Impact of okara on quality and *in vitro* starch digestibility of noodles: the view based on physicochemical and structural properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 237: 124105.
- [7] GÜLER N, SENSOY I. The effect of psyllium fiber on the *in vitro* starch digestion of steamed and roasted wheat based dough [J]. Food Research International, 2023, 168: 112797.
- [8] HU F, LI J Y, ZOU P R, et al. Effects of Lycium barbarum on gluten structure, *in vitro* starch digestibility, and compound noodle quality [J]. Food Bioscience, 2023, 54: 102915.
- [9] LIU K, ZHANG B, CHEN L, et al. Hierarchical structure and physicochemical properties of highland barley starch following heat moisture treatment [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 102-108.
- [10] MIAO L, XU Y, JIA C, et al. Structural changes of rice starch and activity inhibition of starch digestive enzymes by anthocyanins retarded starch digestibility [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 261: 117841.
- [11] CZUBASZEK A, CZAJA A, SOKÓŁ-ŁĘTOWSKA A, et al. Quality of bread enriched with microencapsulated anthocyanin extracts during *in vitro* simulated digestion [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 113: 103724.
- [12] OU S J L, YU J, ZHOU W, et al. Effects of anthocyanins on

- bread microstructure, and their combined impact on starch digestibility[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131744.
- [13] ROCCHETTI G, GIUBERTI G, BUSCONI M, et al. Pigmented sorghum polyphenols as potential inhibitors of starch digestibility: an *in vitro* study combining starch digestion and untargeted metabolomics[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126077.
- [14] LI D, SUN L, YANG Y, et al. Young apple polyphenols postpone starch digestion *in vitro* and *in vivo* [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 56: 127-135.
- [15] ZHANG Y, GUO X, SHI C, et al. Effect of soy proteins on characteristics of dough and gluten[J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126494.
- [16] FAN H, FU F, CHEN Y, et al. Effect of NaCl on rheological properties of dough and noodle quality[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102936.
- [17] HAN C W, MA M, ZHANG H H, et al. Progressive study of the effect of superfine green tea, soluble tea, and tea polyphenols on the physico-chemical and structural properties of wheat gluten in noodle system[J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125676.
- [18] ZHANG M, MA M, YANG T, et al. Dynamic distribution and transition of gluten proteins during noodle processing [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107114.
- [19] DI CAIRANO M, CONDELLI N, CELA N, et al. Formulation of gluten-free biscuits with reduced glycaemic index; Focus on *in vitro* glucose release, physical and sensory properties[J]. LWT, 2022, 154: 112654.
- [20] PRERANA S, ANUPAMA D. Influence of carrot puree incorporation on quality characteristics of instant noodles [J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 43 (3): 1-8.
- [21] VERNON-CARTER E J, ALVAREZ-RAMIREZ J, BELLO-PEREZ L A, et al. Supplementing white maize masa with anthocyanins; effects on masa rheology and on the *in vitro* digestibility and hardness of tortillas[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 91: 102883.
- [22] HUANG Z, WANG J J, CHEN Y, et al. Effect of water-soluble dietary fiber resistant dextrin on flour and bread qualities[J]. Food Chemistry, 2020, 317: 126452.
- [23] YU W, XU D, LI D, et al. Effect of pigskin-originated gelatin on properties of wheat flour dough and bread[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 183-190.
- [24] MA M, XIE Y, WANG C. Effect of anthocyanin-rich extract from black soybean coat on wheat dough rheology and noodle texture [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(1): 1-8.
- [25] 李华, 张珂. 茶多酚 EGCG 对面条面团流变学特性的影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2017(6): 133-137.
- [26] WANG Z, HAO J, DENG Y, et al. Viscoelastic properties, antioxidant activities and structure of wheat gluten modified by rice bran[J]. LWT, 2021, 150: 112003.
- [27] LI H, MA J, ZHAO B, et al. Effect of tea polyphenols on the quality characteristics of fresh wheat noodles in the storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(6): 2562-2569.
- [28] LIU Z, CHEN J, ZHENG B, et al. Effects of matcha and its active components on the structure and rheological properties of gluten[J]. LWT, 2020, 124: 109197.
- [29] SHANG J, ZHAO B, LI L, et al. Impact of A/B-type wheat starch granule ratio on rehydration behavior and cooking quality of noodles and the underlying mechanisms [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134896.
- [30] GUO X N, WEI X M, ZHU K X. The impact of protein cross-linking induced by alkali on the quality of buckwheat noodles[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1178-1185.
- [31] OUYANG Y, XU J, JI F, et al. Properties of transglutaminase-induced myofibrillar/wheat gluten gels[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(6): 2387-2397.
- [32] SUI X, ZHANG Y, ZHOU W. Bread fortified with anthocyanin-rich extract from black rice as nutraceutical sources; its quality attributes and *in vitro* digestibility[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 910-916.
- [33] CHEN S X, NI Z J, THAKUR K, et al. Effect of grape seed powder on the structural and physicochemical properties of wheat gluten in noodle preparation system[J]. Food Chemistry, 2021, 355: 129500.
- [34] ZHU X J, GUO X N, ZHU K X. Effect of sorbitol on the *in vitro* starch digestibility in semi-dried black highland barley noodles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123959.
- [35] 王伟, 崔妍, 郑明珠, 等. 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的抑制动力学[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 185-191.

(责任编辑 闫杏丽)