

不同粒色藜麦挤压面条品质特性分析

汤晓智¹, 张红玉^{1,2}, 余梦兰¹, 陈凤莲²

(1. 南京财经大学食品科学与工程学院/江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心/江苏高校粮油质量安全控制及深加工重点实验室, 南京 210023; 2. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150076)

摘要: 为了探究不同粒色藜麦挤压面条品质特性的差异及机理, 该研究对比分析了不同粒色藜麦粉的基础组分、糊化特性、挤压面条微观结构、蒸煮品质、活性成分及淀粉体外消化特性的差异。结果表明: 白藜麦粉中淀粉含量最高, 糊化后峰值黏度、最终黏度和回生值也最高。红、黑藜麦粉及挤压面条中的多酚、黄酮含量及抗氧化活性显著高于白藜麦粉和挤压面条。挤压后, 淀粉结晶度均下降, 白藜麦面条中淀粉的结晶度最高。红(2.25 min)、黑藜麦(2.75 min)面条的蒸煮时间短, 但蒸煮品质显著低于白藜麦面条 ($P < 0.05$)。扫描电镜显示白藜麦面条淀粉凝胶网络结构更加连续致密, 导致其淀粉水解率和预计升糖指数显著低于红、黑藜麦面条 ($P < 0.05$)。该研究为高品质藜麦面条的生产加工提供理论和技术参考。

关键词: 藜麦; 挤压面条; 蒸煮品质; 营养特性; 微观结构

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403111

中图分类号: TS213.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-13-0284-09

汤晓智, 张红玉, 余梦兰, 等. 不同粒色藜麦挤压面条品质特性分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(13): 284-292. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403111 <http://www.tcsae.org>

TANG Xiaozhi, ZHANG Hongyu, YU Menglan, et al. Quality characteristics of the extruded quinoa noodles with different grain colors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(13): 284-292. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403111 <http://www.tcsae.org>

0 引言

藜麦营养丰富、致敏性低、氨基酸组成平衡, 富含多种生理活性物质如膳食纤维、黄酮和多酚, 具有良好的抗氧化作用, 对血糖血脂具有一定的调节能力, 因此在健康食品和特殊功能性产品的研发上具有良好的发展前景^[1]。藜麦加工产品丰富多样, 包括藜麦饮品、藜麦烘焙产品、藜麦馒头、藜麦面条等^[2]。面条作为传统主食之一, 深受亚洲人喜欢。制备藜麦面条既符合消费者对绿色健康食品的追求, 又符合多数人群的口味, 市场前景十分广阔。但由于藜麦本身不含麸质, 无法形成良好的面筋网络结构, 导致传统工艺制备出的藜麦面条黏弹性差、蒸煮损失高、易浑汤。目前市面上宣称的藜麦面条多以小麦粉为主, 添加少量的藜麦粉($< 30\%$), 面条质量参差不齐, 难以满足消费者对高营养和高品质藜麦面的需求。因此, 研发高品质、高含量甚至全藜麦面条具有重要意义。

在之前的工作中, 本课题组成功地将挤压技术应用与生产品质优良的全杂粮面条^[3-4]。SUN等^[5]成功制备了挤压全荞麦面条, 研究了挤压加工变量对荞麦面条淀粉

糊化度、营养成分变化、蒸煮特性及体外淀粉消化率的影响。在挤压过程中, 淀粉在高温和强剪切力的作用下, 经历糊化、部分降解以及老化, 形成淀粉凝胶结构支撑面条成型。王润等^[6]以青稞粉为主要原料, 通过优化挤压法制备青稞挤压面条的工艺条件及配方, 成功得到煮后不断条, 预测血糖指数(predicted glycemic index, pGI)值低(42.73), 富含多酚、黄酮且具有抗氧化活性的挤压青稞面条。近几年也有学者报道用挤压技术生产藜麦挤压面条。张鑫等^[7]以藜麦粉为主要原料, 制作藜麦挤压面条, 并在研究中确定了最佳的工艺参数。

食物天然色泽可能与其营养价值紧密相关。通常而言, 色泽较深的食物往往具有更丰富的营养成分, 其结构也更为平衡合理^[8]。彩色藜麦含有丰富的花青素、多酚、甜菜素等化合物, 具有延缓衰老、预防心血管疾病、糖尿病等多种生理功效, 是制备健康食品及保健医药品的理想原料之一。藜麦籽粒根据颜色的差异可分为白藜麦、红藜麦、黑藜麦等^[9]。研究表明, 不同颜色的藜麦籽粒在淀粉、蛋白质、脂肪、纤维等成分含量上存在差异^[10], 因此, 以其为原料制成的面条的蒸煮品质和质构特性也不同。与浅色藜麦相比, 深色藜麦的酚类化合物含量更高, 抗氧化活性更强^[11], WANG等^[12]报道酚类化合物有可能通过抑制消化酶来降低淀粉的消化率。尽管目前藜麦挤压面条工艺研究有所报道, 但尚未见关于不同粒色藜麦挤压面条品质特性的相关研究。因此本文选取白、红、黑3种典型粒色藜麦探究其基础组分、糊化特性, 及藜麦挤压面条微观结构、蒸煮品质与营养特

收稿日期: 2024-03-17 修订日期: 2024-05-30

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2023C065); 江苏省自然科学基金项目(BK20200831); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)(苏政办发(2018)87号)

作者简介: 汤晓智, 博士, 教授, 研究方向为全谷物食品加工。

Email: 9120111004@nufe.edu.cn

性间的差异及机理, 旨在为高品质藜麦面条的生产加工提供理论和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

白藜麦(格藜)、红藜麦(农藜 3 号)、黑藜麦(农藜 5 号), 青海巴颜喀拉生态农业有限公司; 芦丁标准品和没食子酸标准品, 上海源叶生物有限公司; 淀粉葡萄糖苷酶(3 260 U/mL), 爱尔兰 Megazyme 公司; α -淀粉酶、胃蛋白酶和胰蛋白酶, 美国 Sigma-Aldrich 公司; 试验所用试剂均为分析纯。

DSE-20/40 双螺杆挤压机, 德国 Brabender 公司; XMTD-8 222 数显鼓风干燥箱, 南京大卫仪器设备有限公司; SCIENTZ-12N 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; ZM200 超速离心粉碎仪, 德国 Retsch 公司; 4 500 快速粘度测定仪(rapid visco analyzer, RVA), 澳大利亚 perten 公司; CM5 色差仪, 日本 Konica Minolta 公司; TA-XT2i 质构分析仪, 英国 Stable Microsystems 公司; TM3000 扫描电镜, 日本 Hitachi 公司; Smart Lab-SEX-射线衍射仪, 日本理学株式会社; Spectra Max-M2e 酶标仪, 美国 Molecular 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 藜麦粉的制备和测定

挑选饱满、完整的白藜麦、红藜麦、黑藜麦籽粒, 经超离心粉碎仪粉碎, 过 0.25 mm 筛, 得到藜麦粉备用。

1) 基础组分的测定

对不同粒色藜麦原粉的基础组分进行测定。水分测定: 参照 GB 5009.3-2016; 灰分测定: 参照 GB 5009.4-2016; 蛋白质测定: 参照 GB 5009.5-2016; 脂肪测定: 参照 GB 5009.6-2016; 总淀粉测定: 参照 Association of Official Analytical Chemists 标准 996.11 《AOAC Official Method 996.11 Starch (Total) in Cereal Products》。粗纤维测定: 参照 GB 5009.10-2003。

2) 糊化特性

利用 RVA 对不同粒色藜麦原粉的糊化特性进行测定。取蒸馏水 25.0 mL 于 RVA 专用铝盒中, 称取一定量藜麦粉样品 (3.5 ± 0.01) g 加入盒中混合。其中, 样品水分基准为 14%。测试采用 GB24853-2010 中标准程序 1 的温度模式进行。测得样品的糊化参数。

1.2.2 藜麦挤压面条的制备

采用 Brabender 双螺杆挤压机制备藜麦挤压面条。挤压参数参考 SUN 等^[5]的研究, 并稍作修改。其中, 从进料区到模头的挤压温度为 40-60-110-80-80-80 °C, 用柱塞泵调节物料水分为 40%。挤压后的面条一部分在 40 °C 烘箱干燥 2 h, 室温平衡 24 h; 另一部分经冷冻干燥后, 磨碎过 0.25 mm 筛得到挤压藜麦面条粉。

1.2.3 藜麦粉挤压前后色差分析

使用色差仪测量藜麦原粉和藜麦挤压面条粉的色差值, 包括亮度 (L^*)、红度 (a^*) 和黄度 (b^*) 值。在测试前使用白板进行校准, 重复测定 3 次, 结果取平

均值。

1.2.4 藜麦粉挤压前后总酚和总黄酮含量测定

1) 总酚含量

取 1.00 g 样品加入 30 mL 体积分数为 70% 的乙醇, 混合均匀, 超声 1 h 后离心过滤得到样品提取液。藜麦原粉和藜麦挤压面条粉总酚含量的测定参考张林华等^[13]的研究方法。以没食子酸为标准品绘制标准曲线, 总酚含量以每克样品中没食子酸当量表示, 单位为 mg/g。

2) 总黄酮含量

参照 NY/T1295-2007, 测定藜麦原粉和藜麦挤压面条粉的总黄酮含量。

1.2.5 藜麦粉挤压前后抗氧化能力测定

1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基清除能力测定: 参考 BAKAR 等^[14]的方法, 吸取样品提取液 1 mL, 加入 4.5 mL DPPH 工作液, 避光反应 30 min, 在波长 517 nm 下测定吸光度。以 Trolox 浓度绘制标准曲线。根据标准曲线计算出样品提取液清除 DPPH 自由基能力, 单位为 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ 。

2, 2'-联氮-二 (3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸) 二铵盐 (2,2'-Azinobis- (3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate, ABTS) 自由基清除能力测定: 参考 RE 等^[15]的方法, 吸取样品提取液 200 μL , 再加入 4 mL ABTS 工作液, 避光反应 30 min, 在波长 734 nm 下测定吸光度。以 Trolox 浓度绘制标准曲线, 根据标准曲线计算出样品提取液清除 ABTS 自由基能力, 单位为 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ 。

1.2.6 X-射线衍射 (X-ray diffraction, XRD)

使用 X-射线衍射仪研究藜麦原粉以及挤压藜麦面条淀粉的晶型结构。样品以 2°/min 的扫描速率从 5°~40° (2 θ) 扫描。

1.2.7 藜麦挤压面条蒸煮和质构特性

1) 蒸煮特性

藜麦挤压面条蒸煮特性的测定参考 XU 等^[4]的研究方法并稍加修改。称取约 3 g 的面条 (质量 M_0) 于 150 mL 沸水中, 用 2 个玻璃片轻轻按压面条, 直至硬芯消失, 记为最佳蒸煮时间。随后将蒸煮后的面汤转移到容量瓶中, 并用蒸馏水定容至 500 mL。取 50 mL 面汤倒入恒重的铝盒中 (质量 M_1), 置于 105 °C 烘箱中干燥至恒重 (质量 M_2), 按式 (1) 计算蒸煮损失:

$$\text{蒸煮损失 (\%)} = \frac{10 \times (M_2 - M_1)}{M_0} \quad (1)$$

2) 质构特性

不同粒色藜麦挤压面条的质构特性测定使用带有 P/36 R 测试探头的 TA-XT2i 质构仪。测试前和测试后速度为 5.00 mm/s, 测试速度为 1.00 mm/s, 形变量 75%, 触发力 5.0 g。

1.2.8 扫描电镜 (scanning electron microscopy, SEM)

采用扫描电镜, 根据 XU 等^[16]报道的方法获得不同粒色藜麦挤压面条的 SEM 图像。所用加速电压为 1.0 kV。

1.2.9 体外消化特性

将不同粒色藜麦挤压面条蒸煮至最佳蒸煮时间后进行体外消化特性的测定，具体方法参考 GOH 等^[17]和 WOOLNOUGH 等^[18]的研究。淀粉的体外消化测试包括模拟的口服，胃和小肠消化 3 个阶段。通过非线性模型拟合淀粉水解动力学和计算平衡浓度 (C_{∞})、酶解速率 (k) 并计算水解指数 (hydrolysis index, HI)、预测血糖指数 (pGI)、快速消化淀粉 (rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉 (slowly digestible starch, SDS) 和抗性淀粉 (resistant starch, RS) 等参数。

1.3 数据处理与分析

试验数据使用 SPSS Statistics 26 统计分析。采用单

因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 范围检验计算均值差异的统计学意义 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 基础营养成分

不同粒色藜麦受品种及栽培条件等影响，其主要营养成分的含量存在较大差异，进而可能影响后续面条的加工品质。3 种藜麦粉的组分测定结果如表 1 所示。

利用挤压法制备无麸质面条主要依赖于淀粉的糊化及老化特性成型。经过糊化-冷却过程，形成稳固的淀粉凝胶网络结构来代替蛋白质面筋骨架，从而提升杂粮面条的品质^[3]。淀粉含量与组成会影响挤压藜麦面条的品质。

表 1 不同粒色藜麦粉的组分质量分数 (湿基)

Table 1 Basic ingredients content of raw quinoa powder with different grain colors (wet base)						%
样品 Sample	灰分 Ash	脂肪 Lipid	蛋白质 Protein	总淀粉 Total starch	粗纤维 Crude fibre	水分 Moisture
白藜麦 White quinoa	3.02±0.07 ^b	6.66±0.02 ^b	13.55±0.02 ^a	58.49±0.39 ^c	5.08±0.06 ^a	9.05±0.03 ^a
红藜麦 Red quinoa	2.64±0.02 ^a	6.91±0.04 ^c	14.22±0.17 ^b	53.50±0.20 ^a	6.57±0.03 ^b	10.84±0.09 ^b
黑藜麦 Black quinoa	2.60±0.17 ^a	6.45±0.35 ^a	13.62±0.09 ^a	55.01±0.56 ^b	7.87±0.07 ^c	11.72±0.01 ^c

注：同一列的字母不同表示样品间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between the samples ($P < 0.05$), the same below.

3 种藜麦原粉的总淀粉含量具有显著性差异 ($P < 0.05$)，由大到小依次为白藜麦 (58.49%)、黑藜麦 (55.01%)、红藜麦 (53.50%)。粗纤维含量随着藜麦粉颜色的加深而显著增加，黑藜麦中粗纤维质量分数为 7.87%，显著高于红藜麦与白藜麦 ($P < 0.05$)。红藜麦中脂肪及蛋白质含量显著高于黑藜麦与白藜麦 ($P < 0.05$)，而白藜麦中灰分含量显著高于红藜麦与黑藜麦 ($P < 0.05$)。

2.2 糊化特性

不同粒色藜麦原粉的糊化特性如表 2 所示。在峰值

黏度、谷值黏度、最终黏度 3 个指标中，由高到低依次为白藜麦、黑藜麦、红藜麦。峰值黏度与淀粉含量相关，它反映了糊化过程中淀粉颗粒的膨胀程度以及结合水的能力^[19]。本研究的峰值黏度与表 1 中淀粉含量趋势一致。据报道，藜麦粉中的蛋白质和脂肪含量与峰值黏度负相关，这可能是因为蛋白质和脂肪的存在会阻碍了淀粉的膨胀和糊化，从而降低其吸水性、膨胀度和黏性^[20]。李进才等^[21]也观察到白藜麦中淀粉含量高，蛋白质含量低，表现出最高的峰值黏度和最终黏度；而红藜麦中蛋白质和脂肪含量高，淀粉含量低，具有最小的峰值黏度。

表 2 不同粒色藜麦原粉的糊化参数

Table 2 Gelatinization parameters of raw quinoa powder with different grain colors						
样品 Sample	峰值黏度 Peak viscosity / (mPa·s)	谷值黏度 Hot paste viscosity / (mPa·s)	崩解值 Breakdown value / (mPa·s)	最终黏度 Final viscosity / (mPa·s)	回生值 Setback value / (mPa·s)	成糊温度 Pasting temperature / °C
白藜麦 White quinoa	1806±15 ^c	1 774±15 ^c	32±10 ^a	2 432±41 ^c	658±30 ^b	68±0 ^a
红藜麦 Red quinoa	1 282±38 ^a	1 107±13 ^a	175±26 ^b	1 412±33 ^a	305±22 ^a	71±1 ^a
黑藜麦 Black quinoa	1 399±32 ^b	1 385±30 ^b	14±4 ^a	1 642±51 ^b	257±21 ^a	79±5 ^b

崩解值是衡量淀粉热糊稳定性的重要指标。崩解值越小，热淀粉糊的稳定性越好^[22]。本研究发现，黑藜麦和白藜麦粉的崩解值显著低于红藜麦 ($P < 0.05$)，表明黑藜麦和白藜麦的淀粉颗粒的抗剪切力更好，形成的热淀粉糊更加稳定^[23]。最终黏度可以反映样品在加热后冷却过程中形成的凝胶的强度，与其他 2 种颜色藜麦粉相比，红藜麦粉的最终黏度比较低，表明其冷却后淀粉快速重排时形成凝胶强度最低^[24]。回生值反映淀粉糊化后在冷却过程中的老化回生程度^[25]。其中，白藜麦粉的回生值显著高于红藜麦与黑藜麦粉 ($P < 0.05$)，为 658 mPa·s。

挤压面条的制备主要依赖于淀粉糊化及老化特性，在冷却过程中淀粉分子的重排形成稳定的凝胶结构对于藜麦挤压面条的蒸煮品质至关重要^[26]。其中成糊温度由高到低依次为黑藜麦、红藜麦、白藜麦，较高的成糊温度提高了红藜麦、黑藜麦粉加工所需的处理条件，不利于面条产品的开发。

2.3 色差

如表 3 所示，不同粒色藜麦粉挤压前后的颜色具有显著性差异 ($P < 0.05$)。其中， L^* 值大小直接反映了样品的亮度， L^* 越大，说明样品的亮度越高。挤压前白藜

麦的 L^* 值显著高于红藜麦和黑藜麦 ($P < 0.05$)。据报道, 决定藜麦颜色的物质是甜菜素和异甜菜素而不是花青素, 在白藜麦中未检出这 2 种物质^[8]。

表 3 挤压前后不同粒色藜麦粉色差的变化
Table 3 Changes of color properties of quinoa powder with different grain colors before and after extrusion

处理 Treatment	样品 Sample	亮度 (L^*) Brightness	红度 (a^*) Redness	黄度 (b^*) Yellowness
挤压前 Before extrusion	白藜麦 White quinoa	91.14±0.07 ^{Bc}	0.22±0.02 ^{Aa}	11.94±0.17 ^{Aa}
	红藜麦 Red quinoa	73.79±0.33 ^{Bb}	4.30±0.11 ^{Ac}	14.7±0.05 ^{Ab}
	黑藜麦 Black quinoa	71.94±0.02 ^{Ba}	3.00±0.02 ^{Ab}	11.90±0.06 ^{Aa}
	白藜麦 White quinoa	83.63±0.11 ^{Ac}	0.30±0.01 ^{Ba}	17.83±0.17 ^{Bb}
挤压后 After extrusion	红藜麦 Red quinoa	59.04±0.15 ^{B^{Ab}}	8.94±0.15 ^{B^c}	19.38±0.31 ^{B^c}
	黑藜麦 Black quinoa	56.76±0.20 ^{Aa}	5.89±0.10 ^{B^b}	15.63±0.24 ^{B^a}
	白藜麦 White quinoa			
	黑藜麦 Black quinoa			

注: 小写字母不同表示同种处理下不同粒色品种藜麦差异显著 ($P < 0.05$), 大写字母不同表示同种粒色藜麦不同处理差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference when compared between quinoa with different colors of the same treatment ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant difference when compared between different treatments of quinoa with the same color ($P < 0.05$).

挤压之后, 白、红、黑藜麦粉 L^* 值显著降低、 a^* 值和 b^* 值显著增加 ($P < 0.05$), 这可能是因为挤压高温高剪切的作用下, 原料中的还原糖以及部分淀粉降解生成的小分子糖与氨基酸发生美拉德反应, 使挤压后藜麦粉颜色加深^[27]。此外挤压过程中蛋白质的聚集和藜麦粉中有色物质的氧化也会引起藜麦粉颜色变暗^[28]。

2.4 总多酚、总黄酮含量

由于藜麦籽粒颜色不同, 其多酚、黄酮的含量也有所不同, 普遍来说深色藜麦中多酚、黄酮的含量明显高于浅色藜麦^[8]。由图 1 可知, 红藜麦中的多酚和黄酮含量最高, 其次为黑藜麦与白藜麦。TANG 等^[8]试验结果显示黑藜麦中的总多酚含量最高, 其次是红藜麦, 这可能是由于不同的品种、生长环境导致的。

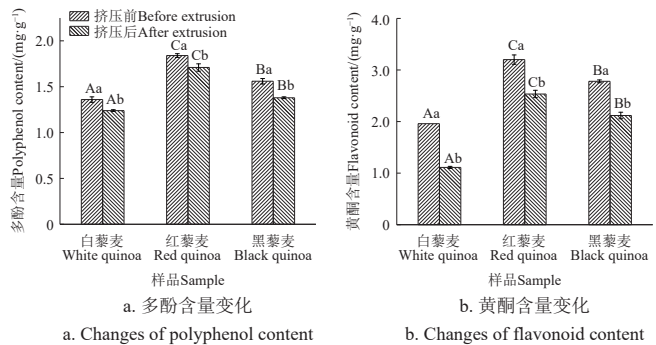


图 1 挤压前后不同粒色藜麦粉多酚含量和黄酮含量变化
Fig.1 Changes of polyphenol content and flavonoid content of quinoa powder with different grain colors before and after extrusion

挤压后面条中多酚、黄酮的含量均有所下降, 这是因为高温高压的挤压环境不可避免地导致部分多酚和黄酮降解、聚合或是分子结构改变, 进而降低其黄酮和多酚的提取率^[29]。此外, 挤压过程中酚类和黄酮类化合物可能会与蛋白质等大分子相互作用, 从而影响它们实际含量的检测^[30]。

2.5 抗氧化活性测定

藜麦中丰富的多酚类和黄酮类化合物含量赋予其良好的抗氧化性。通过对比 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力的变化来评价不同粒色藜麦原粉和藜麦挤压面条粉的抗氧化性。由图 2 可以看出不同粒色藜麦粉和藜麦挤压面条粉的抗氧化活性具有显著差异 ($P < 0.05$), DPPH、ABTS 自由基抗氧化活性依次为红藜麦、黑藜麦、白藜麦。挤压后, 不同粒色藜麦粉的 DPPH、ABTS 自由基抗氧化活性均显著下降 ($P < 0.05$), 总体趋势与多酚和黄酮的含量变化趋势相一致。虽然经过挤压机热加工后, 抗氧化活性均有所下降, 但与小麦等主粮比仍处于较高水平^[31]。

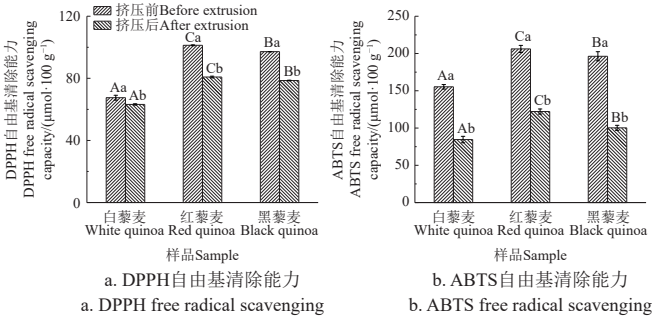


图 2 挤压前后不同粒色藜麦粉抗氧化能力
Fig.2 Antioxidant capacity of quinoa powder with different grain colors before and after extrusion

2.6 X-射线衍射分析

淀粉是天然多晶体系, 主要由结晶区和无定形区两部分组成。由图 3 可知, 藜麦原粉在 15°、17°、18°、23°处有强衍射峰, 是典型的 A 型特征峰, 这与杜春婷等^[32]的研究结果相一致。挤压后, A 型尖峰特征峰逐渐变成弥散宽峰, 淀粉晶型由 A 型向 V 型转变, 三色藜麦粉的结晶度分别由 17.12%、21.41% 和 25.66% 降低至 10.53%、8.06%、7.71%。这可能是因为挤压过程中, 藜麦淀粉颗粒经历剧烈的高温高剪切, 淀粉的结晶结构被破坏, 部分游离脂质进入直链淀粉的螺旋腔形成包合物, 形成了新的结晶区。对比三色挤压面条的结晶度可知, 白藜麦挤压面条淀粉的结晶度最高, 黑藜麦最低。这可能是因为白藜麦中淀粉含量较高, 糊化特性中也显示其回生值较高, 淀粉回生重结晶形成了相对稳定有序的分子结构, 从而提高了挤压藜麦面条中淀粉的结晶度^[33]。除淀粉含量外, 蛋白质和膳食纤维的含量可能也会对淀粉的相对结晶度造成影响。据报道, 蛋白质和膳食纤维的存在会阻碍支链淀粉双螺旋结构的重新排列, 降低淀粉的相对结晶度, 抑制淀粉回生^[34]。与白藜麦粉相比, 黑藜麦和红藜麦中的蛋白质和粗纤维含量较多,

对于淀粉回生的抑制作用更为明显，从而降低了黑藜麦与红藜麦挤压面条中淀粉的结晶度。

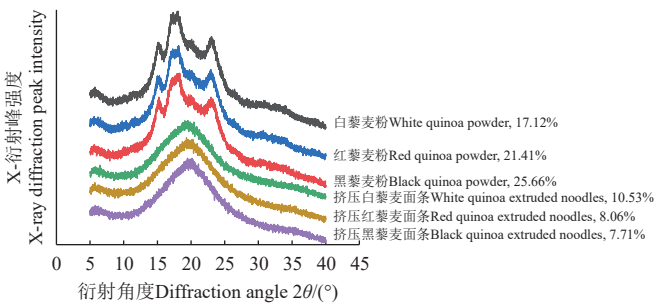


图 3 藜麦原粉和挤压藜麦面条的 X-射线衍射图
Fig.3 X-ray diffraction patterns of raw quinoa powder and quinoa extruded noodles

2.7 蒸煮特性、质构特性

蒸煮时间和蒸煮损失是评价面条蒸煮品质的重要标

准。不同粒色藜麦挤压面条的蒸煮时间有显著差异 ($P < 0.05$)。由表 4 可以看出，红藜麦挤压面条的蒸煮时间最短，仅为 2.25 min。这可能是因为红藜麦粉中淀粉含量较低，挤压后形成的淀粉凝胶网络结构松散、不连续，利于水分进入面条内部。蒸煮损失是指煮面时水中溶解的干物质含量，是评价面条品质的一个重要指标，主要与直链淀粉浸出和蒸煮过程中可溶性物质的溶解有关[35]。白藜麦挤压面条的蒸煮损失为 7.46%，显著低于红藜麦面条 (10.12%) 和黑藜麦挤压面条 (9.16%) ($P < 0.05$)。这可能是因为白藜麦淀粉含量最高，挤压后形成了更致密的淀粉凝胶网络结构 (图 4)，减少了蒸煮过程中可溶性物质的溶出。黑藜麦和红藜麦的总淀粉含量均低于白藜麦，蛋白质和粗纤维含量高于白藜麦，挤压后形成的淀粉凝胶结构松散，蒸煮过程中面条表面的淀粉和可溶性物质更易溶出，从而导致更高的蒸煮损失。

表 4 不同粒色藜麦挤压面条蒸煮特性和质构特性
Table 4 Cooking quality and textural properties of quinoa extruded noodles with different grain colors

样品 Sample	蒸煮时间 Cooking time/ min	蒸煮损失 Cooking loss/%	硬度 Hardness /N	弹性 Springiness	内聚性 Cohesiveness	咀嚼度 Chewiness
白藜麦 White quinoa	3.50±0 ^c	7.46±0.32 ^a	30.71±0.54 ^c	0.97±0.01 ^b	0.74±0.01 ^c	1 768±10 ^c
红藜麦 Red quinoa	2.25±0 ^a	10.12±0.20 ^c	18.82±0.27 ^a	0.89±0.02 ^a	0.60±0 ^a	1 073±9 ^a
黑藜麦 Black quinoa	2.75±0 ^b	9.16±0.19 ^b	27.64±0.13 ^b	0.90±0.11 ^a	0.62±0 ^b	1 636±20 ^b

不同粒色藜麦挤压面条的质构特性与蒸煮损失呈现出一致的趋势，其中白藜麦挤压面条的质构特性显著优于其他 2 个样品 ($P < 0.05$)。硬度是评价熟面条品质的重要指标，影响消费者对面条的接受度。原料中的淀粉含量越高，挤压后面条的凝胶强度越大，3 种藜麦挤压面条的硬度在 18.82~30.71 N 之间，其中，白藜麦挤压面条硬度显著高于黑藜麦与红藜麦挤压面条 ($P < 0.05$)。除硬度外，白藜麦挤压面条的弹性 (0.97)、内聚性 (0.74) 和咀嚼度 (1 768) 也显著高于其余 2 个样品 ($P < 0.05$)。有研究指出面条硬度、弹性、胶黏性与面粉的峰值黏度呈正相关[36]。除了面粉的峰值黏度影响外，在面条的煮制过程中，水溶性物质溶出，导致面条表面结构受到破坏，从而降低面条的硬度和弹性。粗纤维含量也会对面条的品质造成影响，粗纤维含量的增加会破坏面条中淀粉凝胶结构连续性，削弱淀粉凝胶结构的强度，降低藜麦面条的质构参数[37]。

2.8 扫描电镜

图 4 为不同粒色藜麦挤压面条蒸煮后的表面和横截面的扫描电镜图。通过扫描电镜图可以清晰的观察到面条表面和截面中的孔洞分布，这些孔洞是冻干过程中面条水分升华所形成的。孔洞的均匀性，规则性可以反映出在挤压过程中形成的淀粉凝胶网络结构的均匀性，间接反映出面条的品质。从图中可以观察到，白藜麦挤压面条表面孔洞排列相对紧密有序，孔洞大小较为均匀。相比之下，黑藜麦挤压面条蒸煮后表面淀粉凝胶结构出

现明显的坍塌，孔洞大小不均匀。而红藜麦挤压面条表面已经没有完整的凝胶网络结构，孔洞较大且分布不规则。进一步观察不同粒色藜麦挤压面条横截面电镜图发现，从边缘到中心，孔洞逐渐密集，且孔径变小，表明淀粉凝胶网络结构更加致密。

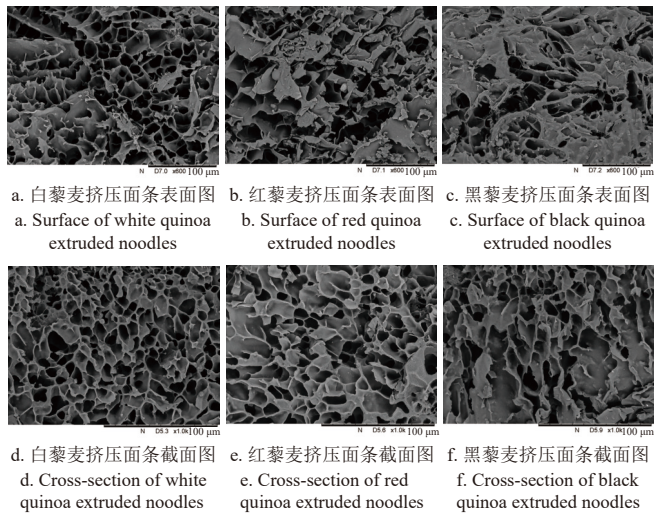


图 4 不同粒色藜麦挤压面条扫描电镜图
Fig.4 SEM images of quinoa extruded noodles with different grain colors

从图 4a 可以看出，白藜麦挤压面条截面边缘处依然能保持规则的凝胶网络结构。相比之下，黑藜麦挤压面条的凝胶网络结构在靠近面条边缘时变得松散且无规则。挤压红藜麦面条截面边缘部分网络结构已经完全被破坏，

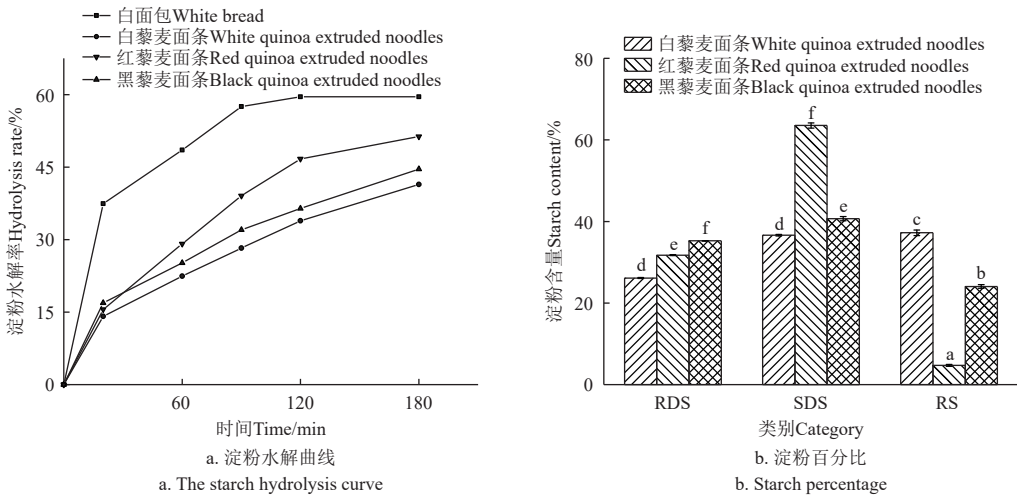
仅在靠近中心位置部分还能观察到较为完整的凝胶网络。

糊化后的淀粉在冷却过程中会发生老化现象，分散的淀粉分子开始重新缔合并形成凝胶网络结构。由表 2 可知，与红藜麦和黑藜麦相比，白藜麦的最终黏度和回生值较高。较高的最终黏度和回生值有利于挤压面条中淀粉凝胶网络的形成，从而赋予面条更好的品质。此外，淀粉凝胶网络也与结晶度有关。淀粉的老化程度越高，相对结晶度越大^[38]。由 XRD 结果可知，白藜麦挤压面条中的淀粉结晶度要高于红藜麦与黑藜麦挤压面条。在老化过程中，直链淀粉的回生重结晶有效的保持了面条淀粉凝胶结构的完整性，使其具有较高的凝胶强度以承受蒸煮过程中的压力，因此白藜麦挤压面条在蒸煮后依然能够保持较好的品质。

2.9 体外淀粉消化性

在挤压机高温高剪切的环境中，抗消化因子发生降解，淀粉的结晶结构被破坏，暴露出更多消化酶的作用位点，提高了淀粉的消化性。不同粒色藜麦挤压面条总淀粉水解曲线如图 5a 所示。不同粒色藜麦面条在 0~

20 min 时消化曲线迅速上升，淀粉快速水解消化，后面的消化过程中淀粉水解率增速减缓趋于稳定。挤压面条样品的淀粉水解率大小依次为红藜麦、黑藜麦、白藜麦。藜麦中多酚组成会对淀粉的消化特性造成影响。大量文献报道藜麦多酚一方面可能抑制淀粉消化酶的活性^[12]，另一方面，可能与淀粉生成淀粉-多酚复合物从而影响淀粉分子对酶的敏感性^[39]。尽管红藜麦中的多酚含量较高，但从本研究来看，影响挤压面条中淀粉消化性最主要的因素可能是淀粉凝胶网络结构。红藜麦挤压面条的淀粉凝胶结构网络较差，蒸煮损失高，蒸煮过程会导致更多的物质溶出，增加了酶与淀粉的接触机率，从而加速了酶解作用。且挤压后红藜麦面条中淀粉的结晶度较低，易被消化酶酶解。相比较之下，白藜麦挤压面条具有更致密的淀粉凝胶网络，增加了酶与底物接触的空间位阻，从而降低了淀粉酶的水解程度。白藜麦挤压面条中的淀粉结晶度也较高，直链淀粉重结晶形成空间阻碍作用，使得淀粉酶的活性基团无法靠近淀粉结晶区的葡萄糖苷键，进而产生抗酶解特性^[40]。



注：RDS 为快消化淀粉，SDS 为慢消化淀粉，RS 为抗性淀粉；字母不同表示样品间差异显著（ $P < 0.05$ ）。
Note: RDS was rapid digestible starch, SDS was slow digestible starch, RS was resistant starch; Different lowercase letters indicate significant difference between the samples ($P < 0.05$).

图 5 不同粒色藜麦挤压面条淀粉水解率和淀粉百分比
Fig.5 The starch hydrolysis curve and starch percentage of quinoa extruded noodles with different grain colors

不同粒色藜麦挤压面条的水解指数及预测血糖生成指数如表 5 所示。其中白藜麦挤压面条的 HI（52.54）和 pGI（68.56）显著低于红藜麦与黑藜麦挤压面条（ $P < 0.05$ ）。图 5b 显示，白藜麦面条 RDS、SDS 含量较低，RS 较高。PENG 等^[41] 研究报道 3 种藜麦粉的 pGI 大小依次为白藜麦、红藜麦、黑藜麦，这可能与黑藜麦和红藜麦中较高含量的酚类化合物有关。本试验结果发现红藜麦和黑藜麦挤压面条的 pGI 值显著高于白藜麦挤压面条（ $P < 0.05$ ）。主要是因为藜麦挤压面条中淀粉的消化性与其凝胶网络结构密切相关。白藜麦挤压面条具有更致密的淀粉凝胶网络，导致其抗性淀粉含量最高，pGI 值最低。在本研究中，为了模拟人体的食用过程，面条在挤压成型以及开水复热蒸煮 2 次热加工过程，导致了藜麦挤压面条略高的 pGI 值（68.56~77.59），但其仍低

于常见的小麦面条的 pGI（76.23~84.25）^[42]。

表 5 不同粒色藜麦挤压面条的计算平衡浓度、酶解速率、水解指数、预测血糖指数				
Table 5 The calculated equilibrium concentration, enzymatic hydrolysis speed rate, hydrolysis index, predicted glycemic index of quinoa extruded noodles with different grain colors				
藜麦颜色 Grain colors	平衡浓度 Calculated equilibrium concentration	酶解速率 Enzymatic hydrolysis speed rate	水解指数 Hydrolysis index	预测血糖指数 Predicted glycemic index
白藜麦 White quinoa	45.36±0.23 ^a	0.01±0 ^a	52.54±0.29 ^a	68.56±0.60 ^a
红藜麦 Red quinoa	56.98±0.55 ^b	0.01±0 ^a	69.00±0.70 ^c	77.59±0.93 ^c
黑藜麦 Black quinoa	45.95±0.11 ^a	0.01±0 ^a	58.19±0.40 ^b	71.66±0.85 ^b

3 结 论

本研究对比了青海产区不同粒色藜麦粉的基础组分、糊化特性以及挤压面条的微观结构、蒸煮和营养特性。结果表明白藜麦粉的成糊温度较低, 峰值黏度、回生值较高, 适合藜麦挤压面条的加工。挤压后, 藜麦面条中淀粉晶体结构被破坏, 结晶度下降。在面条品质特性方面, 白藜麦挤压面条的蒸煮损失最低(7.46%), 硬度(30.71 N)、弹性(0.97)最高。红藜麦中的多酚、黄酮含量高, 相应的抗氧化活性高于白藜麦与黑藜麦, 但红、黑藜麦挤压面条淀粉凝胶网络较为松散, 蒸煮品质较差。体外消化实验表明: 白藜麦挤压面条的抗性淀粉含量最高, 预测血糖生成指数(predicted glycemic index, pGI)最低为 68.56。综上所述, 深色藜麦中活性物质含量相对较高, 白藜麦更适用于生产高品质低 GI 的挤压面条。

[参 考 文 献]

- [1] 付丽红, 李晓斌. 基于岭脊分析的藜麦淀粉提取及糊化特性研究[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 299-306.
FU Lihong, LI Xiaobin. Extraction and gelatinization characteristics of *Chenopodium quinoa* Willd starch based on ridge analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(18): 299-306. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈茜, 王振兴, 孙健, 等. 藜麦的营养成分、生物活性及加工利用[J]. *生物加工过程*, 2023, 21(3): 292-300.
CHEN Xi, WANG Zhenxing, SUN Jian, et al. Research progress on nutritional components, functional activities, and processing and utilization of quinoa[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2023, 21(3): 292-300. (in Chinese with English abstract)
- [3] SUN X, MENG L, TANG X. Retrogradation behavior of extruded whole buckwheat noodles: An innovative water pre-cooling retrogradation treatment[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 99: 103234.
- [4] XU X, MENG L, GAO C, et al. Construction of starch-sodium alginate interpenetrating polymer network and its effects on structure, cooking quality and in vitro starch digestibility of extruded whole buckwheat noodles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 143: 108876.
- [5] SUN X, YU C, FU M, et al. Extruded whole buckwheat noodles: effects of processing variables on the degree of starch gelatinization, changes of nutritional components, cooking characteristics and in vitro starch digestibility[J]. *Food & Function*, 2019, 10(10): 6362-6373.
- [6] 王润, 党斌, 杨希娟, 等. 青稞低 GI 挤压面条制作工艺优化及营养与抗氧化活性分析[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(6): 37-44.
WANG Run, DANG Bin, YANG Xijuan, et al. Processing technology optimization and nutrition and antioxidant activity analysis of highland barley low glycemic index extruded noodles[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(6): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张鑫, 任元元, 孟资宽, 等. 低 GI 藜麦面条挤压工艺及体外消化特性研究[J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(4): 57-62.
ZHANG Xin, REN Yuanyuan, MENG Zikuan, et al. Study on extrusion technology and in vitro digestion characteristics of low GI quinoa noodles[J]. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 2021, 57(4): 57-62. (in Chinese with English abstract)
- [8] TANG Y, LI X, ZHANG B, et al. Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes[J]. *Food Chemistry*, 2015, 166: 380-388.
- [9] QIAN G, LI X, ZHANG H, et al. Metabolomics analysis reveals the accumulation patterns of flavonoids and phenolic acids in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) grains of different colors[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 17: 100594.
- [10] 洪佳敏, 林宝妹, 张帅, 等. 6 种杂粮营养成分分析及评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(18): 6254-6260.
HONG Jiamin, LIN Baomei, ZHANG Shuai, et al. Analysis and evaluation of nutritional components in 6 kinds of minor cereals[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(18): 6254-6260. (in Chinese with English abstract)
- [11] HAN Y, CHI J, ZHANG M, et al. Characterization of saponins and phenolic compounds: Antioxidant activity and inhibitory effects on α -glucosidase in different varieties of colored quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd)[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2019, 83(11): 2128-2139.
- [12] WANG X, LAO X, BAO Y, et al. Effect of whole quinoa flour substitution on the texture and in vitro starch digestibility of wheat bread[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106840.
- [13] 张林华, 张红玉, 谢凯文, 等. 探究后处理工艺对藜麦挤压面条品质的影响[J/OL]. *中国粮油学报*: 1-12 [2024-05-23]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000257>.
ZHANG Linhua, ZHANG Hongyu, XIE Kaiwen, et al. Investigation of the influence of the post-treatment techniques of quinoa extruded noodles on their quality[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*: 1-12. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000257>. (in Chinese with English abstract)
- [14] BAKAR M F A, MOHAMED M, RAHMATB A, et al. Phytochemicals and antioxidant activity of different parts of bambangan (*Mangifera pajang*) and tarap (*Artocarpus odoratissimus*)[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(2): 479-483.
- [15] RE R. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, 26(9-10): 1231-1237.
- [16] XU X, GAO C, XU J, et al. Hydration and plasticization effects of maltodextrin on the structure and cooking quality of extruded whole buckwheat noodles[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131613.
- [17] GOH R, GAO J, ANANINGSIH V K, et al. Green tea catechins reduced the glycaemic potential of bread: An in vitro digestibility study[J]. *Food Chemistry*, 2015, 180: 203-210.
- [18] WOOLNOUGH J W, BIRD A R, MONRO J A, et al. The effect of a brief salivary α -amylase exposure during chewing on subsequent in vitro starch digestion curve profiles[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2010, 11(8): 2780-2790.
- [19] BHAT F M, RIAR C S. Effect of composition, granular

- morphology and crystalline structure on the pasting, textural, thermal and sensory characteristics of traditional rice cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2019, 280: 303-309.
- [20] 张宏, 林向阳, 朱榕璧, 等. 淀粉类制品加工特性影响因素的研究[J]. 农产品加工 (学刊), 2008(11): 16-18.
ZHANG Hong, LIN Xiangyang, ZHU Rongbi, et al. Study on the influencing factors for processing of characteristics of starch products[J]. *The Processing of Agricultural Products*, 2008(11): 16-18. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李进才, 朱凯莉, 刘梦杰, 等. 藜麦营养成分与加工品质的相关性分析[J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2022, 55(6): 655-663.
LI Jincai, ZHU Kaili, LIU Mengjie, et al. Correlation analysis between the nutritional component and processing quality of quinoa[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2022, 55(6): 655-663. (in Chinese with English abstract)
- [22] 霍金杰, 王可心, 岳喜庆, 等. 槲皮素对挤压大米淀粉结构及功能特性的影响[J/OL]. 农业工程学报: 1-8[2024-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.S.20240514.1416.002.html>.
HUO Jinjie, WANG Kexin, YUE Xiqing, et al. Effects of quercetin on the structure and functional properties of extrusion rice starch[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*: 1-8[2024-05-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2047.S.20240514.1416.002.html>. (in Chinese with English abstract)
- [23] 姚哲, 张辉, 彭金龙, 等. 不同品种大米营养组分与糊化、酶解特性的相关性分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 173-180.
YAO Zhe, ZHANG Hui, PENG Jinlong, et al. Correlation analysis between nutrient components, pasting properties and enzymatic hydrolysis properties of different varieties of rice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(13): 173-180. (in Chinese with English abstract)
- [24] 吴迪, 葛飞, 马红, 等. 不同磨粉方式对青稞全粉理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 59-67.
WU Di, GE Fei, MA Hong, et al. Effects of different milling methods on physicochemical properties of highland barley whole flour[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(3): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王莉, 王鹏, 于小帅, 等. 挤压体系中可得然胶对小麦淀粉回生特性和冻融稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 331-338.
WANG Li, WANG Peng, YU Xiaoshuai, et al. Effects of curdlan on wheat starch retrogradation and freeze-thaw stability in the extrusion system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*: 2024, 40(1): 331-338. (in Chinese with English abstract)
- [26] JIA B, YAO Y, LIU J, et al. Physical properties and in vitro starch digestibility of noodles substituted with tartary buckwheat flour[J]. *Starch - Stärke*, 2019, 71(5/6): 1800314.
- [27] BRAHMA S, WEIER S A, ROSE D J. Effects of selected extrusion parameters on physicochemical properties and in vitro starch digestibility and β -glucan extractability of whole grain oats[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 85-90.
- [28] JAFARI M, KOOCHKEI A, MILANI E. Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 75: 324-331.
- [29] 赵广河, 张瑞芬, 苏东晓, 等. 全谷物酚类物质及其抗氧化活性研究进展[J]. 中国食品学报, 2017, 17(8): 183-196.
ZHAO Guanghe, ZHANG Ruifen, SU Dongxiao, et al. The advances on polyphenols in whole grains and its antioxidant activity[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(8): 183-196. (in Chinese with English abstract)
- [30] SHARMA P, GUJRAL H S, SINGH B. Antioxidant activity of barley as affected by extrusion cooking[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(4): 1406-1413.
- [31] ALVAREZ-JUBETE L, WIJNGAARD H, ARENDT E K, et al. Polyphenol composition and in vitro antioxidant activity of amaranth, quinoa buckwheat and wheat as affected by sprouting and baking[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(2): 770-778.
- [32] 杜春婷, 党斌, 杨希娟, 等. 不同加工方式对藜麦淀粉结构与功能特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 54-61.
DU Chunting, DANG Bin, YANG Xijuan, et al. Effects of different processing methods on structural and functional properties of quinoa starch[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 37(4): 54-61. (in Chinese with English abstract)
- [33] VELÁZQUEZ-BARRETO F F, MIÑANO H A, ALVAREZ-RAMIREZ J, et al. Structural, functional, and chemical properties of small starch granules: Andean quinoa and kiwicha[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106883.
- [34] 王磊鑫, 吴娜娜, 吕莹果, 等. 挤压蒸煮加工米糠可溶和不溶膳食纤维对米淀粉性质的影响及其相互作用分析[J]. 食品科学, 2022, 43(16): 107-113.
WANG Leixin, WU Nana, LV Yingguo, et al. Effect of soluble and insoluble dietary fibers from extrusion cooked rice bran on the properties of rice starch and their interactions[J]. *Food Science*, 2022, 43(16): 107-113. (in Chinese with English abstract)
- [35] XIA R, FU M, WANG Z, et al. Effects of frozen storage on the quality characteristics of frozen whole buckwheat extruded noodles[J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136856.
- [36] 任立焕. 马铃薯面条加工工艺的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2017: 23-24.
REN Lihuan. *The Processing Technology Research of Potato Noodles*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017: 23-24. (in Chinese with English abstract)
- [37] 陶春生, 陈存社, 王克俭. 挤压改性麦麸膳食纤维对面条品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(9): 132-136.
TAO Chunsheng, CHEN Cunshe, WANG Kejian. Effects of extrusion modification of wheat bran dietary fiber on quality of noodle[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(9): 132-136. (in Chinese with English abstract)
- [38] 卜宇, 陈秋桂, 牛倩文, 等. 淀粉老化调控对燕麦全粉挤压面条蒸煮品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(10): 1327-1333.
BU Yu, CHEN Qiugui, NIU Qianwen, et al. Effect of starch retrogradation on the cooking quality of whole oat flour

- extrusion noodles[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(10): 1327-1333. (in Chinese with English abstract)
- [39] DENG N, DENG Z, TANG C, et al. Formation, structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 667-675.
- [40] 张天学. 热处理对青稞淀粉结构和性质的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 58-83.
ZHANG Tianxue. Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of Highland Barley Starch[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 58-83. (in Chinese with English abstract)
- [41] PENG M, YIN L, DONG J, et al. Physicochemical characteristics and in vitro digestibility of starches from colored quinoa (*Chenopodium quinoa*) varieties[J]. *Journal of Food Science*, 2022(5): 87.
- [42] XU M, WU Y, HOU G G, et al. Evaluation of different tea extracts on dough, textural, and functional properties of dry Chinese white salted noodle[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2019, 101: 456-462.

Quality characteristics of the extruded quinoa noodles with different grain colors

TANG Xiaozhi¹, ZHANG Hongyu^{1,2}, YU Menglan¹, CHEN Fenglian²

(1. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics/Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety/Key Laboratory for Quality Safety Control and Deep Processing of Cereals and Oils, Nanjing 210023, China; 2. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China)

Abstract: Quinoa is one of the most popular ingredients in the creation of healthy and environmentally friendly foods, due to its rich nutrient composition, balanced amino acids, and various bioactive substances. Quinoa noodles can be prepared for green and healthy food, particularly for better taste and market prospects. However, the traditional processing of wheat noodles cannot fully meet the high quality of quinoa noodles at present, due to the lack of gluten. Among them, extrusion has been applied to prepare the whole quinoa noodles. The natural color of food can also be closely related to its nutritional value. Quinoa grains with different colors often vary in the content of starch, protein, fat, fiber, and active substances. This study aims to clarify the great influence on the cooking and nutritional quality of extruded noodles made with quinoa as raw materials. The mechanism of quality of extruded quinoa noodles with different colors was explored to compare the basic components, gelatinization of quinoa flours, the microstructure, cooking quality, active components, and starch digestion. Results showed that the white quinoa achieved the highest content of total starch and crude fiber, compared with the red and black quinoa powder. The content of crude fiber increased significantly with the deepening of the color of quinoa powder. Among the three types of quinoa powder, the red quinoa exhibited the highest levels of fat and protein content. In terms of gelatinization properties, the peak viscosity, final viscosity, and setback value of white quinoa powder were superior to those of red and black quinoa powder. The pasting temperature of white quinoa powder was lower than that of red and black quinoa powder. Furthermore, L^* values significantly decreased after extrusion, whereas, a^* value and b^* values significantly increased ($P < 0.05$). Additionally, the red and black quinoa powder, along with their extruded noodles, exhibited higher levels of polyphenols, flavonoids, and antioxidant activities, compared with the white quinoa. X-ray diffraction revealed that the extrusion process caused the changes of starch crystal type from type A to V. There was a decrease of starch crystallinity in the white, red, and black quinoa noodles from 17.12%, 25.55%, and 21.41% to 10.53%, 8.06% and 7.71%, respectively. White quinoa noodles shared the highest crystallinity, due to the high starch content and high setback value of powder. The recrystallization of starch formed a relatively stable and orderly molecular structure, thus enhancing the crystallinity of starch in the extruded quinoa noodles. Although the cooking time of red and black quinoa extruded noodles was shorter than that of white ones, their overall cooking quality was notably inferior. The cooking loss of white quinoa noodles was 7.46%, which was significantly lower than that of red (10.12%) and black (9.16%). At the same time, the extruded white quinoa noodles also exhibited the highest hardness (30.71 N) and springiness (0.97). The extruded noodles relied primarily on the gelatinization and retrogradation of starch. The rearrangement of starch was dominated to form a stable gel structure after extrusion for the cooking quality of extruded quinoa noodles. Scanning electron microscope images confirmed that the gel network structure of white quinoa extruded noodles was denser and more complete, thereby leading to the lower cooking loss and superior texture, compared with the red and black quinoa extruded noodles. The in vitro starch digestibility showed that the white quinoa noodles contained the highest resistant starch content and the lowest predicted glycemic index of 68.56. In summary, the red and black quinoa presented a relatively higher content of active substances, but white quinoa was more suitable for the production of high-quality and low-GI extruded noodles. This finding can provide the theoretical and technical reference for the production and processing of high-quality quinoa noodles.

Keywords: quinoa; extruded noodles; cooking quality; nutritional characteristics; microstructure