DOI:10.12441/spyswjs.20250221001 [文章编号] 1673-1689(2025)09-0129-12

切块大小和蒸煮时间对彩色马铃薯泥品质的影响

车雨晴[1] 池 驰[1] 董 宇[1,2,3,4] 纳添仓[1,2,3,4*]

(1. 青海大学农林科学院,青海 西宁 810016; 2. 西北马铃薯教育部工程研究中心,青海 西宁 810016; 3. 青藏高原生物技术教育部重点实验室(青海大学),青海 西宁 810016; 4. 青藏高原种质资源研究与利用实验室,青海 西宁 810016)

摘要:【目的】探讨蒸煮时间、切块大小对红色和紫色马铃薯蒸煮前后色泽、质地、淀粉结构和花青素质量分数的影响,为彩色马铃薯泥的加工提供理论依据。【方法】以红色和紫色马铃薯为研究对象,采用3种切块大小(30 mm×30 mm×10 mm、20 mm×20 mm×10 mm、16 mm×16 mm×10 mm)和5种蒸煮时间(0、3、5、7、10 min)对其进行处理。测量了蒸煮前后的色泽变化(表面亮度L^*值、红绿值a^*值和黄蓝值b^*值),质地变化(硬度、黏性、咀嚼性和胶着性),淀粉结构以及花青素质量分数。分析了蒸煮时间和切块大小对彩色马铃薯泥质地、淀粉糊化和花青素质量分数的影响。【结果】蒸煮时间、切块大小对红色和紫色马铃薯的色泽产生显著影响,尤其是L^*、a^*、b^*值。随着蒸煮时间的延长,3种切块大小的红色和紫色马铃薯的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性均呈现下降趋势。与蒸制相比,煮制更容易导致这些质地指标的下降。切块大小为30 mm×30 mm×10 mm的彩色马铃薯在相同蒸煮时间下,其质地指标明显高于较小切块(20 mm×20 mm×10 mm和16 mm×16 mm×10 mm)。对于可制泥的切块,蒸煮时间和切块大小对红色马铃薯泥的黏性和咀嚼性影响较大,但对紫色马铃薯泥则无明显影响。延长蒸煮时间至10 min可加速淀粉的糊化过程,破坏淀粉结构,同时导致花青素质量分数下降。【结论】最佳的彩色马铃薯加工条件为煮制、切块大小为16 mm×16 mm×10 mm,蒸制时间为7 min。该条件下制备的彩色马铃薯泥具有最佳的色泽和质地,能够满足彩色马铃薯泥加工的质量需求。

关键词:彩色马铃薯泥;切块大小;蒸煮时间;色泽;质地;淀粉

Effects of Cutting Size and Steaming/Boiling Time on the Quality of Colored Mashed Potatoes

CHE Yuqing[1] *CHI Chi*[1] *DONG Yu*[1,2,3,4] *NA Tiancang*[1,2,3,4*]

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Engineering Research Center of Potato in Northwest Region, Ministry of Education, Xining 810016, China; 3. Key Laboratory of Qinghai-Tibetan Plateau Biotechnology (Qinghai University), Ministry of Education, Xining 810016, China; 4. Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Tibet Plateau Germplasm Resources, Xining 810016, China)

Abstract: [**Objective**] This study explored the effects of steaming/boiling time and cutting size on the color, texture, starch structure, and anthocyanin mass fraction of red and purple potatoes before and after cooking, aiming to provide a theoretical basis for the processing of colored mashed potatoes. [**Method**] Red and purple potatoes were taken as the research objects. They were cut into three different sizes (30 mm×30 mm×10 mm, 20 mm×20 mm×10 mm, and 16 mm×16 mm×10 mm) and steamed or boiled for five time periods (0, 3, 5, 7, and 10 min). The color parameters (including surface brightness L^*, red-green value a^*, and yellow-blue value b^*),

基金项目:青海省基础研究计划项目(应用基础研究2024-ZJ-738)。

通信作者:纳添仓(1972—),男,研究员,硕士研究生导师,主要从事马铃薯品种选育研究。E-mail: 1996990029@qhu.edu.cn

收稿日期:2025-02-21 **修回日期:**2025-04-20

texture properties (hardness, viscosity, chewiness, and adhesiveness), starch structure, and anthocyanin mass fraction were measured before and after steaming/boiling. The effects of steaming/boiling time and cutting size on the texture, starch gelatinization, and anthocyanin mass fraction of mashed potato were analyzed. [**Result**] Steaming/boiling time and cutting size had significant effects on the color, especially the L^*, a^*, and b^* values, of red and purple potatoes. With the extension of steaming/boiling time, the hardness, viscosity, chewiness, and adhesiveness of red and purple potatoes of all three cutting sizes showed a downward trend. Compared with steaming, boiling was more likely to cause the declines of these texture indicators. For potatoes with a cutting size of 30 mm×30 mm×10 mm, their texture indicators were significantly higher than those of smaller blocks (20 mm×20 mm×10 mm and 16 mm×16 mm×10 mm) under the same steaming/boiling time. For the blocks that could be made into mashed potato, steaming/boiling time and cutting size had greater impacts on the viscosity and chewiness of red mashed potato, but had no significant effect on those of purple mashed potato. Extending the steaming/boiling time to 10 min accelerated the starch gelatinization process, disrupted the starch structure, and caused a decrease in anthocyanin mass fraction. [**Conclusion**] The optimal processing conditions for colored potatoes are as follows: boiling for 7 min and cutting into blocks of 16 mm×16 mm×10 mm. The colored mashed potato prepared under these conditions has the best color and texture and can meet the quality requirements for the processing of colored mashed potato.

Keywords: colored mashed potato; cutting size; steaming/boiling time; color; texture; starch

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)属于茄科茄属,原产于南美洲安第斯高原,是仅次于小麦、水稻和玉米的第四大粮食作物[1]。马铃薯富含丰富的维生素B族(VB_1、VB_2、VB_6和泛酸)、纤维素、氨基酸、蛋白质、脂肪和淀粉等营养成分[2-3]。然而,与欧美等发达国家相比,我国的马铃薯加工仍以基础加工产品为主,如淀粉、全粉、薯片和薯条等,深加工技术及品种相对匮乏,且技术水平相对低[4]。

目前,马铃薯泥多用黄肉或白肉马铃薯品种进行加工,随着对马铃薯营养价值认识的深入,彩色马铃薯逐渐成为研究热点。彩色马铃薯含有更丰富的花青素、酚类、黄酮类物质等,能够提高机体免疫能力、延缓衰老,并预防多种慢性疾病,增强血管弹性,改善循环系统功能,预防心血管疾病等功能[5-7]。然而,花青素作为一种水溶性色素,其稳定性易受温度、时间、处理方式等因素的影响,导致其稳定性较差[8]。在马铃薯泥的制备过程中,通常需要清洗、去皮、切片、护色、蒸煮和制泥等步骤[9]。在马铃薯的蒸煮过程中,蒸煮时间的长短会直接影响花青素的保留率,蒸煮时间过长会导致花青素降解或流失,而过短的蒸煮时间则可能导致花青素的保留不足,且制泥效果较差[10-13]。此外,切块大小同样会影响蒸煮温度的均匀性,较大的薯块可能需要更长的蒸煮时间,会对花青素造成破坏;切块过小可能会增加薯块的表面与蒸煮工具的接触面积,最终也会加速花青素降解[14]。

随着食品领域对彩色马铃薯关注度的提升,国内外对彩色马铃薯的研究逐渐增多,主要集中在彩色马铃薯的营养成分、抗氧化特性及其在食品中的应用[15-16]。然而,关于切块大小与蒸煮时间对彩色马铃薯加工质量的影响的研究仍较少,尤其是在优化蒸煮过程、提高花青素稳定性方面,还缺少系统性且深入的探讨。在已有的彩色马铃薯深加工研究中,部分学者认为较长的蒸煮时间有助于制备马铃薯泥,但可能导致营养成分流失[17]。也有研究指出,缩短蒸煮时间虽然有利于花青素的保留,但可能影响马铃薯泥的品质[18]。因此,如何平衡这两者关系,优化蒸煮工艺,是本研究的重要创新点。

作者通过对红色马铃薯和紫色马铃薯的比较,探讨切块大小和蒸煮时间对彩色马铃薯制泥过程中色泽、质地、淀粉颗粒结构以及感官品质的影响,确定影响彩色马铃薯泥质量的最优工艺参数,在保证高花青素保留率的前提下,实现最佳的感官质量和加工效果。以期为彩色马铃薯的深加工技术提供理论依据,推动马铃薯精深加工领域的技术创新,促进产业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红色马铃薯和紫色马铃薯：作者所在实验室自繁品种，生育周期均为120~130 d，并于2024年4月17日播种于青海省农林科学院生物技术研究所试验地，于9月18日采收。该试验地土壤类型为栗钙土，地势平坦，肥力均匀，前茬作物为油菜。收获时选择250~350 g无机械损伤和病虫害的彩色马铃薯块茎，装入塑料网袋中并立即运回青海省农林科学院生物技术研究所地窖中贮藏，等待后续加工处理。

色差仪：CR-400型，日本Konica Minolta公司；质构仪：TA.GEL型，上海保圣实业发展有限公司；多功能切丁器：M1型，佛山市格新美科技有限公司；压泥机：英德市舜溢五金有限公司；显微镜：Axioscope 5型，德国卡尔蔡司显微镜有限公司；高速冷冻离心机：3-30K型，德国Sigma公司；全自动多功能酶标仪：Synergy H1型，基因有限公司。

1.2 马铃薯泥加工工艺流程

马铃薯泥加工工艺流程：彩色马铃薯清洗—去皮—切块—蒸煮—制泥。

1.3 切块及蒸煮处理

用多功能切丁机将马铃薯块茎切成3种尺寸（长×宽×高：30 mm×30 mm×10 mm、20 mm×20 mm×10 mm和16 mm×16 mm×10 mm），随后进行蒸煮处理，设置蒸煮时间为0、3、5、7、10 min，最后用压泥机将处理后的切块制泥。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 蒸制后不同切块色泽测定

用色差仪对蒸制前后以及不同切块的色泽进行测定[19]，L^*值表示表面亮度、a^*值表示红绿值（负值表示偏绿色，正值表示偏红色）以及b^*值表示黄蓝值（负值表示偏蓝色，正值表示偏黄色），每个处理测定8块马铃薯，重复3次。

1.4.2 蒸制后不同切块质构特性分析

用质构仪对蒸制前后以及不同切块的质地特性（硬度、黏性、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性和回复性）进行测定[20]。选用TA/2柱形探头，测试前速度3.0 mm/s，测试速度0.5 mm/s，测试后速度2.0 mm/s，触发力0.2 N，距离5 mm。每个处理测定3块马铃薯，重复3次。

1.4.3 彩色马铃薯泥质构特性分析

用质构仪对马铃薯泥的质地特性（黏性、弹性、咀嚼性、胶着性、内聚性和回复性）进行测定。选用TA/36柱形探头，测试前速度3.0 mm/s，测试速度0.5 mm/s，测试后速度2.0 mm/s，触发力0.2 N，距离5 mm。每个处理测定3块马铃薯，重复3次。

1.4.4 彩色马铃薯泥淀粉颗粒观察

利用光学显微镜对马铃薯泥进行淀粉颗粒结构观察并拍照。

1.4.5 彩色马铃薯泥花青素质量分数测定

参照文献[21]的方法进行测定。称取0.5 g样品加到含有质量分数1%盐酸的甲醇溶液中，匀浆后在20 ℃黑暗条件下浸泡24 h，于20 ℃、12 000 *g*离心20 min，取200 μL加到96孔板，使用全自动多功能酶标仪测定530、620、650 nm处的吸光度，计算花青素3-葡萄糖苷当量。

1.5 数据分析

用SPSS软件对数据进行处理，运用单因素、双因素和三因素方差分析（ANOVA）进行检验。当$P<0.05$时，表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 切块大小和蒸煮时间对彩色马铃薯蒸煮后色泽的影响

从表1可知，蒸煮时间和切块大小对红色和紫色马铃薯的色泽产生了显著影响。对于蒸制红色马铃薯，20 mm×20 mm×10 mm切块处理后蒸制7 min和16×16×10 mm切块处理后蒸制3~10 min的L^*值与处理前无显著差异，而其他处理方式的L^*值则显著低于处理前（$P<0.05$）；30 mm×30 mm×10 mm切块处理后蒸制3 min和蒸制7~10 min、20 mm×20 mm×10 mm切块处理后蒸制3~5 min、16 mm×16 mm×10 mm切块处理后蒸制5~10 min的a^*值与处理前无显著差异，其余处理方式的a^*值则显著低于处理前（$P<0.05$）；30 mm×30 mm×10 mm切块处理后蒸制3 min和20 mm×20 mm×10 mm切块处理后蒸制3~5 min的b^*值高于或与处理前无显著差异，其他处理方式下的b^*值则显著低于处理前（$P<0.05$）。对于蒸制紫色马铃薯，30 mm×30 mm×10 mm切块处理后蒸制10 min、20 mm×20 mm×10 mm切块处理后蒸制3~5 min和蒸制10 min、16 mm×16 mm×10 mm切

块处理后蒸制3~10 min的L^*值高于或与处理前无显著差异，其余处理方式下的L^*值均显著低于处理前（P<0.05）；16 mm×16 mm×10 mm切块处理后蒸制7 min的a^*值显著低于处理前（P<0.05），其他处理的a^*值均高于或与处理前无显著差异；所有处理方式的b^*值均显著低于处理前（P<0.05）。

表1 蒸煮时间和切块大小对彩色马铃薯色泽变化影响

Table 1 Effects of steaming/boiling time and cutting size on the color parameters of colored potatoes

加工方式	切块长度/mm	时间/min	红色马铃薯			紫色马铃薯		
			L^*值	a^*值	b^*值	L^*值	a^*值	b^*值
处理前			28.43±3.25^{bc}	7.46±1.34^{abc}	5.21±0.60^{b}	25.92±3.44^{cdef}	6.07±3.44^{bcd}	2.21±0.87^{b}
蒸制	30	3	25.09±1.86^{def}	8.37±0.70^{a}	5.39±0.63^{b}	21.28±2.39^{hij}	5.93±0.94^{bcd}	−4.90±1.24^{ab}
	30	5	22.66±0.72^{h}	6.36±0.50^{efg}	3.97±0.62^{c}	20.28±1.20^{j}	5.30±1.01^{cde}	−5.04±2.03^{c}
	30	7	23.45±0.72^{gh}	6.87±0.30^{bcd}	3.78±0.50^{c}	22.83±3.46^{ghij}	6.71±2.16^{b}	−6.68±2.28^{c}
	30	10	24.05±0.63^{fgh}	6.89±0.39^{bcd}	3.39±0.44^{c}	25.22±1.44^{cde}	10.50±0.99^{a}	−9.65±0.65^{cd}
	20	3	24.02±2.98^{gh}	7.41±1.75^{abc}	6.42±0.69^{a}	26.70±3.35^{bcd}	6.07±1.02^{bcd}	−4.19±2.11^{a}
	20	5	22.24±1.02^{h}	7.20±1.26^{bcd}	5.79±0.34^{ab}	24.94±3.98^{cde}	5.44±1.19^{bcd}	−4.43±3.21^{ab}
	20	7	27.08±1.99^{bcd}	6.37±1.10^{def}	2.07±1.03^{ef}	23.09±2.65^{ghi}	5.74±0.60^{bcd}	−5.27±2.37^{fgh}
	20	10	23.60±2.50^{gh}	5.69±0.40^{ghi}	2.51±0.73^{de}	24.39±2.36^{cdef}	6.10±0.77^{bcd}	−3.06±3.58^{def}
	16	3	26.45±3.92^{cde}	5.14±1.37^{i}	2.28±1.30^{ef}	25.38±3.46^{cde}	5.91±1.80^{bcd}	−5.55±2.22^{efg}
	16	5	28.46±2.53^{bc}	6.75±0.73^{bcd}	1.89±1.17^{efg}	15.91±3.27^{cde}	6.01±1.04^{bcd}	−5.08±1.33^{fgh}
	16	7	28.22±2.10^{bc}	7.29±0.68^{bcd}	1.73±1.31^{efg}	33.66±4.65^{a}	3.74±1.59^{ijk}	−5.46±2.04^{fgh}
	16	10	26.80±4.11^{cd}	6.51±0.97^{cdef}	2.06±0.79^{ef}	26.92±2.76^{bcd}	6.21±2.35^{bcd}	−1.90±1.67^{n}
煮制	30	3	24.26±1.58^{fgh}	6.65±0.26^{cde}	1.20±0.32^{c}	25.31±0.36^{cde}	10.10±0.90^{a}	−9.82±0.78^{cd}
	30	5	24.37±1.24^{efg}	6.97±0.38^{bcd}	0.96±0.38^{c}	25.62±1.48^{cde}	10.31±0.96^{a}	−9.88±0.59^{cd}
	30	7	24.38±1.11^{efg}	7.10±0.36^{bcd}	1.51±0.39^{cd}	24.27±1.75^{def}	9.51±1.04^{a}	−9.83±0.61^{cde}
	30	10	25.20±0.93^{def}	7.10±0.38^{bcd}	1.17±0.66^{c}	26.75±1.48^{bcd}	10.38±1.08^{a}	−9.84±0.50^{c}
	20	3	28.53±1.66^{bc}	6.35±0.54^{efg}	0.85±0.67^{ij}	24.71±4.15^{cde}	4.72±1.11^{efgh}	−3.21±3.39^{ijk}
	20	5	28.74±0.57^{bc}	6.95±1.04^{bcd}	0.63±0.74^{jk}	24.19±3.65^{efg}	4.38±1.36^{fghi}	−2.97±3.83^{jk}
	20	7	28.45±1.17^{bc}	6.44±1.03^{cdef}	−0.01±1.14^{kl}	26.60±3.06^{bcd}	3.58±0.84^{kl}	−4.42±2.06^{kl}
	20	10	28.86±1.53^{bc}	5.65±0.42^{ghi}	−0.55±0.51^{l}	25.16±6.78^{cde}	4.02±1.02^{ghij}	−1.25±3.36^{lm}
	16	3	27.35±2.98^{bcd}	6.11±1.75^{fgh}	1.20±0.69^{ghi}	27.40±4.21^{bcd}	4.97±1.03^{defg}	−2.30±3.06^{ghi}
	16	5	29.45±1.02^{ab}	6.60±1.26^{cdef}	0.96±0.34^{hij}	25.20±4.50^{fgh}	3.12±1.11^{l}	−2.00±2.38^{ijk}
	16	7	31.35±1.99^{a}	5.59±1.10^{hi}	1.51±1.03^{fgh}	29.30±5.85^{b}	3.97±2.73^{hij}	−1.40±4.05^{mn}
	16	10	28.48±2.50^{bc}	5.07±0.40^{i}	1.17±0.73^{ghi}	27.50±3.14^{bc}	3.69±0.72^{jkl}	−2.70±2.48^{hij}

注：同列不同小写字母代表不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

对于煮制红色马铃薯，在20 mm×20 mm×10 mm切块处理后煮制3~10 min和16 mm×16 mm×10 mm切块处理后煮制3~10 min，其L^*值高于或与处理前无显著差异，其余处理方式下的L^*值均显著低于处理前（P<0.05）；30 mm×30 mm×10 mm切块处理后煮制3~10 min、20 mm×20 mm×10 mm切块处理后煮制5 min和7 min以及16 mm×16 mm×10 mm切块处理后煮制5 min的a^*值与处理前无显著差异，其余处理方式下的a^*值均显著低于处理前（P<0.05）；所有处理方式下的b^*值均显著低于处理前（P<0.05）。对于煮制紫色马铃薯，所有处理方式下的L^*值均高于或与处理前无显著差异；30 mm×30 mm×10 mm切块处理后煮制3~10 min和16 mm×16 mm×10 mm切块处理后煮制3 min，其a^*值与处理前无显著差异，其他处理方式下的a^*值均显著低于处理前（P<0.05）；所有处理方式下的b^*值均显著低于处理前（P<0.05）。

如表2所示，综合方差分析结果可知，蒸煮时间和切块大小的交互作用显著影响了红色马铃薯和紫色马铃薯的色泽变化。蒸制和煮制对色泽的影响不同，蒸制时较小的切块和适中的蒸制时间能够较好保持色泽，尤其是L^*值和a^*值。相反，较大的切块和较长的蒸制时间会导致色泽显著降低，这可能是由于蒸制过程中温度和压力的积累使得马铃薯内的色素（如花青素）和其他营养成分遭到破坏。煮制马铃薯的结果表明，相较于蒸制，煮制会导致色泽的快速变化，尤其是b^*值普遍下降，表明在煮制过程中，热水的浸泡加速了色素的流失。另一方面，较小的切块在煮制过程中可能会增加表面积，从而加速花青素和其他色素的溶出或降解，导致色泽变化较为显著。因此，蒸制比煮制更能保持彩色马铃薯的色泽，尤其是在蒸制时间和切块大小的合理选择下，可以较好地保留花青素和维持色泽。

表2　不同因子对彩色马铃薯色泽变化指标影响的三因素方差分析

Table 2　Three-factor variance analysis of the effects of different factors on the color parameters of colored potatoes

因子	彩色马铃薯的色泽变化指标					
	红色马铃薯			紫色马铃薯		
	L^*值	a^*值	b^*值	L^*值	a^*值	b^*值
A	0.00	0.01	0.00	0.09	0.70	0.00
B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A×*B*	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
A×*C*	0.25	0.29	0.00	0.86	0.00	0.00
B×*C*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A×*B*×*C*	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00

注：*A*：加工方式；*B*：切块长度；*C*：蒸煮时间。

2.2　切块大小和蒸煮时间对彩色马铃薯蒸煮后质地特性的影响

由表3可知，无论采用蒸制还是煮制，3种切块大小的红色和紫色马铃薯的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性均随着蒸煮时间的延长呈下降趋势，尤其是在煮制时，硬度、黏性、咀嚼性和胶着性的下降趋势更加显著。这表明煮制比蒸制更能加速马铃薯质构指标的下降，这可能是由于在煮制过程中，热水的浸泡使得马铃薯中的淀粉和细胞壁结构更容易被破坏，从而导致质地变化较快。此外，在相同蒸煮时间处理后，小的切块尺寸比大的切块尺寸的马铃薯在硬度、黏性、咀嚼性和胶着性等方面数值更低。这是因为较小切块的比表面积较大，蒸煮过程中会有更多的淀粉溶解，使得马铃薯质地的变化更为显著。在弹性方面，3种切块大小的红色马铃薯和紫色马铃薯在蒸煮3 min后弹性增加，但随着蒸煮时间的延长，弹性呈下降趋势。这可能是由于长时间的蒸煮会导致马铃薯细胞壁和结构进一步软化，使得弹性丧失。

如表4所示，蒸煮时间和切块大小显著影响红色马铃薯和紫色马铃薯加工后的黏性、弹性、内聚性和回复性。煮制比蒸制更能显著降低马铃薯的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性[22]。较小切块的马铃薯在相同蒸煮时间处理后质构更软，这表明切块尺寸对质地有较大影响。

2.3　彩色马铃薯泥质地特性变化

由表5可知，红色马铃薯和紫色马铃薯经蒸煮处理3 min后，无论切块大小如何，均无法制泥；当蒸制时间延长至5 min时，仅16 mm×16 mm×10 mm切块处理的红色马铃薯和紫色马铃薯能够制泥，而30 mm×30 mm×10 mm和20 mm×20 mm×10 mm切块的2种彩色马铃薯则无法制泥；延长蒸制时间至7~10 min时，3种切块大小的红色马铃薯和紫色马铃薯均能成功制泥。采用煮制方式处理红色马铃薯和紫色马铃薯5~10 min后，所有切块大小的红色马铃薯和紫色马铃薯均能制泥。结果表明，蒸煮时间和切块大小对红色马铃薯和紫色马铃薯能否制泥具有显著影响。

表 3 蒸煮时间和切块大小对彩色马铃薯蒸煮后质构特性变化影响

Table 3 Effects of steaming/boiling time and cutting size on the texture properties of colored potatoes after steaming/boiling

加工方式	切块长度/mm	时间/min	红色马铃薯							紫色马铃薯						
			硬度/N	黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性	硬度/N	黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性
处理前			11.82±2.85^{a}	−181.50±7.90^{h}	0.58±0.22^{a}	1.08±0.70^{ab}	1.83±0.66^{a}	0.15±0.02^{cde}	0.58±1.38^{g}	6.87±0.86^{hi}	−72.95±3.13^{fg}	0.26±0.04^{a}	0.19±0.07^{fgh}	0.71±0.14^{abc}	0.10±0.01^{gh}	2.28±1.92^{hij}
蒸制	30	3	7.11±1.54^{b}	−90.90±5.38^{g}	0.70±0.10^{a}	0.75±0.21^{bcd}	1.06±0.18^{bc}	0.15±0.03^{cdf}	2.73±1.27^{def}	5.27±0.94^{ij}	−58.01±6.12^{fg}	0.50±0.16^{abc}	0.41±0.24^{abc}	0.75±0.26^{ab}	0.14±0.03^{bcd}	3.06±0.96^{fgh}
	30	5	5.09±1.11^{cde}	−93.10±9.48^{de}	0.70±0.13^{a}	0.55±0.20^{cde}	0.77±0.20^{cde}	0.15±0.03^{cdf}	2.86±1.69^{cde}	4.05±0.54^{a}	−48.99±5.58^{bcd}	0.49±0.17^{gh}	0.28±0.13^{cdef}	0.55±0.11^{def}	0.14±0.03^{cde}	4.53±0.68^{cd}
	30	7	3.51±1.16^{fgh}	−61.33±6.64^{cd}	0.64±0.16^{a}	0.42±0.17^{defg}	0.63±0.15^{def}	0.19±0.03^{cde}	4.26±1.94^{c}	3.17±0.82^{ab}	−54.23±12.00^{ijk}	0.41±0.11^{hi}	0.20±0.11^{efgh}	0.46±0.14^{efg}	0.14±0.02^{abc}	4.71±0.12^{cd}
	30	10	2.91±1.25^{hil}	−55.29±0.45^{cde}	0.51±0.15^{a}	0.27±0.18^{efgh}	0.50±0.21^{efg}	0.18±0.04^{cde}	2.56±1.71^{ef}	2.54±0.90^{de}	−47.99±10.94^{ghi}	0.35±0.09^{ab}	0.13±0.05^{ijk}	0.37±0.12^{hi}	0.15±0.02^{abc}	0.58±1.20^{j}
	20	3	6.75±0.81^{b}	−105.28±5.01^{cde}	0.82±0.03^{a}	1.11±0.17^{a}	1.33±0.19^{b}	0.20±0.03^{cd}	3.28±0.70^{cde}	6.15±0.68^{ij}	−69.45±3.83^{def}	0.56±0.12^{cde}	0.48±0.19^{a}	0.82±0.19^{a}	0.13±0.02^{de}	3.01±0.62^{fgh}
	20	5	4.04±1.51^{def}	−73.95±0.53^{c}	0.55±0.12^{a}	0.38±0.17^{efgh}	0.69±0.25^{def}	0.17±0.02^{cde}	2.37±1.95^{f}	4.73±0.88^{b}	−60.84±2.91^{d}	0.59±0.17^{defg}	0.44±0.23^{ab}	0.71±0.21^{abc}	0.14±0.02^{bcd}	3.22±0.95^{defg}
	20	7	3.75±0.98^{efi}	−67.65±7.77^{c}	0.66±0.15^{a}	0.48±0.30^{def}	0.69±0.30^{def}	0.18±0.03^{cde}	2.95±1.68^{cde}	3.97±0.73^{efg}	−62.11±10.70^{ijl}	0.50±0.17^{hi}	0.31±0.14^{bcde}	0.59±0.12^{cde}	0.15±0.02^{abc}	1.84±1.90^{ij}
	20	10	1.97±0.86^{klm}	−72.89±10.81^{c}	0.37±0.20^{a}	0.14±0.16^{ghi}	0.31±0.15^{ij}	0.17±0.06^{cde}	1.17±1.48^{g}	2.67±0.82^{efg}	−43.04±5.83^{gh}	0.34±0.17^{abc}	0.14±0.11^{ijk}	0.38±0.08^{ghi}	0.15±0.03^{abcd}	4.57±0.82^{cd}
	16	3	5.95±1.06^{bc}	−100.17±6.23^{e}	0.76±0.13^{c}	0.84±0.36^{abc}	1.07±0.34^{cd}	0.18±0.03^{a}	2.79±1.46^{g}	5.74±0.85^{k}	−65.94±6.96^{bc}	0.55±0.20^{efgh}	0.48±0.29^{a}	0.81±0.22^{a}	0.14±0.03^{bcd}	2.90±0.77^{ghi}
	16	5	4.05±0.92^{def}	−70.85±6.48^{de}	0.59±0.23^{a}	0.48±0.31^{def}	0.73±0.28^{de}	0.17±0.04^{cde}	0.31±0.24^{g}	4.05±0.69^{a}	−60.07±5.64^{a}	0.55±0.15^{efg}	0.37±0.18^{abc}	0.65±0.14^{bcd}	0.16±0.02^{ab}	3.80±0.95^{def}
	16	7	2.20±0.64^{jkl}	−62.31±6.49^{b}	0.24±0.07^{a}	0.06±0.03^{ij}	0.24±0.07^{ijk}	0.11±0.03^{ef}	0.43±0.16^{g}	3.17±0.63^{b}	−53.01±6.88^{ijk}	0.39±0.14^{hi}	0.18±0.12^{ghi}	0.42±0.13^{fgh}	0.13±0.02^{def}	4.42±0.67^{cde}
	16	10	2.06±0.53^{lm}	−66.01±8.73^{b}	0.43±0.25^{a}	0.22±0.26^{efgh}	0.38±0.29^{ghi}	0.16±0.04^{cdef}	3.72±1.87^{cde}	1.77±0.54^{gh}	−50.39±5.33^{ghi}	0.38±0.25^{ab}	0.19±0.24^{efgh}	0.37±0.26^{hi}	0.16±0.05^{a}	5.27±0.45^{bc}
煮制	30	3	6.06±1.72^{bc}	−80.04±5.15^{a}	0.81±0.14^{a}	0.85±0.28^{abc}	1.02±0.21^{bc}	0.18±0.04^{cde}	3.02±1.64^{cde}	5.83±0.81^{jk}	−63.15±2.21^{de}	0.52±0.17^{bcde}	0.37±0.21^{abc}	0.66±0.18^{bcd}	0.12±0.02^{efg}	2.94±0.72^{fgh}
	30	5	4.17±1.58^{def}	−74.47±7.90^{f}	0.55±0.15^{a}	0.39±0.20^{defg}	0.68±0.21^{def}	0.17±0.03^{cde}	3.78±1.07^{cde}	3.50±0.82^{a}	−43.98±6.81^{ab}	0.48±0.18^{fgh}	0.22±0.10^{efgh}	0.47±0.11^{bcd}	0.14±0.02^{cde}	4.14±0.72^{def}
	30	7	2.71±0.83^{hij}	−38.47±8.51^{g}	0.39±0.14^{a}	0.20±0.12^{efgh}	0.47±0.15^{efg}	0.18±0.03^{cde}	3.96±1.48^{cd}	3.07±0.73^{bc}	−37.28±6.74^{ijk}	0.35±0.06^{hi}	0.16±0.05^{hij}	0.45±0.11^{efg}	0.15±0.02^{abc}	3.80±0.74^{def}
	30	10	1.78±0.62^{klm}	−39.26±5.49^{g}	0.43±0.30^{a}	0.16±0.14^{fgh}	0.36±0.16^{hij}	0.20±0.39^{c}	3.82±1.31^{cd}	2.08±0.67^{def}	−26.42±5.96^{jkl}	0.35±0.27^{bcde}	0.11±0.07^{ik}	0.31±0.11^{efg}	0.15±0.03^{abc}	4.47±0.89^{cd}
	20	3	4.45±0.89^{def}	−84.73±7.84^{e}	0.52±0.21^{b}	0.38±0.27^{def}	0.65±0.24^{hij}	0.15±0.04^{b}	4.01±1.67^{g}	5.62±0.69^{ij}	−68.93±4.78^{jkl}	0.60±0.18^{i}	0.44±0.19^{ab}	0.75±0.15^{abc}	0.14±0.03^{cde}	3.10±0.71^{defg}
	20	5	3.04±1.19^{ghi}	−95.10±5.60^{cd}	0.31±0.12^{a}	0.14±0.11^{ghi}	0.38±0.20^{fghi}	0.12±0.04^{def}	4.41±1.92^{cd}	4.53±0.71^{a}	−81.51±6.70^{1n}	0.48±0.15^{i}	0.32±0.16^{bcd}	0.64±0.15^{ab}	0.14±0.02^{bcd}	4.25±0.95^{def}
	20	7	2.41±1.18^{ijk}	−105.39±6.15^{de}	0.24±0.09^{a}	0.07±0.06^{hij}	0.25±0.12^{ijk}	0.11±0.04^{ef}	5.76±1.73^{b}	3.60±0.91^{cd}	−52.96±0.35^{fg}	0.44±0.14^{ab}	0.25±0.16^{defg}	0.53±0.17^{bcd}	0.15±0.03^{abc}	3.00±0.51^{fgh}
	20	10	1.61±0.97^{m}	−117.77±6.40^{a}	0.18±0.09^{a}	0.04±0.05^{j}	0.18±0.11^{kl}	0.11±0.03^{ef}	5.33±1.73^{ab}	2.57±0.71^{hi}	−33.84±6.37^{fg}	0.34±0.15^{bc}	0.14±0.09^{hij}	0.40±0.11^{defg}	0.15±0.03^{abc}	4.10±0.66^{def}
	16	3	5.01±1.31^{cd}	−77.59±6.26^{a}	0.40±0.09^{a}	0.29±0.15^{efg}	0.69±0.26^{de}	0.13±0.02^{cde}	3.53±1.87^{cde}	4.95±0.96^{ij}	−67.90±5.40^{jkl}	0.53±0.15^{j}	0.43±0.20^{bcd}	0.76±0.22^{abc}	0.15±0.03^{cde}	3.62±0.80^{def}
	16	5	2.74±0.79^{ijk}	−69.79±5.43^{de}	0.28±0.11^{a}	0.10±0.08^{hij}	0.31±0.15^{ijk}	0.11±0.02^{ef}	3.78±1.72^{f}	3.16±0.59^{b}	−44.30±6.64^{ijk}	0.44±0.15^{hi}	0.24±0.14^{jk}	0.49±0.16^{i}	0.15±0.03^{fgh}	4.49±0.87^{hi}
	16	7	2.05±0.50^{klm}	−74.98±2.80^{c}	0.15±0.03^{a}	0.03±0.01^{j}	0.17±0.06^{jkl}	0.08±0.01^{f}	6.96±1.90^{a}	3.13±0.52^{c}	−58.45±3.49^{a}	0.35±0.12^{b}	0.17±0.10^{k}	0.44±0.14^{j}	0.13±0.03^{i}	4.09±0.89^{b}
	16	10	1.54±0.64^{m}	−101.63±7.77^{a}	0.16±0.07^{c}	0.03±0.02^{fgh}	0.14±0.05^{l}	0.10±0.03^{cdf}	8.52±1.75^{g}	2.55±0.81^{ij}	−43.45±4.35^{jkl}	0.34±0.17^{j}	0.16±0.14^{k}	0.39±0.18^{j}	0.15±0.04^{hi}	4.54±0.58^{a}

注：同列不同小写字母代表不同处理组之间差异显著（P<0. 05）。

表 4　不同因子对彩色马铃薯蒸煮后质构特性影响的三因素方差分析

Table 4　Three-factor variance analysis of the effects of different factors on the texture properties of colored potatoes after steaming/boiling

因子	彩色马铃薯质构特性变化指标													
	红色马铃薯							紫色马铃薯						
	硬度/N	黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性	硬度/N	黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性
A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
A×*B*	0.20	0.44	0.00	0.14	0.05	0.00	0.02	0.15	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
A×*C*	0.30	0.00	0.02	0.25	0.10	0.00	0.00	0.03	0.06	0.00	0.53	0.56	0.43	0.00
B×*C*	0.26	0.00	0.00	0.16	0.46	0.00	0.10	0.03	0.00	0.00	0.42	0.01	0.00	0.00
A×*B*×*C*	0.28	0.00	0.00	0.18	0.27	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.99	0.45	0.01	0.00

注：*A*：加工方式；*B*：切块长度；*C*：处理时间。

表 5　切块大小对彩色马铃薯泥质构特性的影响

Table 5　Effects of cutting size on the texture properties of colored mashed potato

加工方式	切块长度/mm	时间/min	红色马铃薯						紫色马铃薯					
			黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性	黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性
蒸制	30	7	234.23±101.14^{b}	0.43±0.12^{a}	1.37±0.18^{a}	3.18±0.47^{a}	0.43±0.05^{b}	0.04±0.01^{a}	−301.80±41.20^{ab}	0.41±0.08^{a}	1.13±0.35^{abc}	2.74±0.39^{ab}	0.50±0.07^{a}	0.04±0.01^{b}
	30	10	575.08±45.51^{c}	0.32±0.04^{bcd}	0.76±0.17^{b}	2.28±0.35^{cd}	0.36±0.02^{bc}	0.04±0.00^{b}	−529.64±27.94^{b}	0.27±0.03^{abc}	0.65±0.32^{abc}	2.32±0.03^{b}	0.35±0.03^{ab}	0.08±0.05^{a}
	20	7	−13.01±1.24^{a}	0.34±0.02^{bc}	0.43±0.15^{cd}	1.26±0.38^{ab}	0.42±0.01^{bc}	0.04±0.00^{cd}	−428.67±39.08^{b}	0.29±0.07^{abc}	0.81±0.26^{abc}	2.08±0.02^{b}	0.38±0.14^{ab}	0.05±0.02^{ab}
	20	10	−7.78±1.77^{a}	0.37±0.05^{b}	0.57±0.19^{c}	1.51±0.38^{ab}	0.44±0.04^{a}	0.05±0.00^{bc}	−393.35±15.94^{ab}	0.22±0.04^{bc}	0.74±0.36^{abc}	3.56±1.14^{b}	0.34±0.01^{b}	0.05±0.01^{b}
	16	5	−3.14±0.84^{a}	0.33±0.08^{bcd}	0.37±0.36^{cde}	1.00±0.78^{bc}	0.40±0.06^{a}	0.05±0.00^{cde}	−471.39±9.22^{ab}	0.38±0.02^{abc}	0.81±0.10^{abc}	2.15±0.38^{b}	0.45±0.04^{ab}	0.05±0.01^{b}
	16	7	−1.85±1.03^{a}	0.34±0.06^{bc}	0.24±0.13^{ef}	0.66±0.25^{bc}	0.40±0.04^{a}	0.05±0.01^{def}	−441.54±18.69ab	0.34±0.06^{abc}	1.80±0.41^{ab}	5.46±2.27^{ab}	0.45±0.00^{ab}	0.06±0.01^{b}
	16	10	−5.88±0.83^{a}	0.28±0.02^{cde}	0.14±0.03^{ef}	0.51±0.08^{de}	0.33±0.02^{b}	0.04±0.01^{ef}	−270.95±227.45^{ab}	0.32±0.06^{bc}	0.71±0.23^{bc}	2.31±1.12^{b}	0.41±0.22^{ab}	0.05±0.00^{b}
煮制	30	5	−5.97±1.73^{a}	0.25±0.02^{e}	0.11±0.04^{f}	0.44±0.11^{de}	0.31±0.01^{bc}	0.04±0.00^{f}	−382.91±13.63^{b}	0.36±0.03^{ab}	0.65±0.21^{abc}	1.84±0.63^{b}	0.47±0.07^{ab}	0.04±0.01^{ab}
	30	7	−9.08±0.74^{a}	0.26±0.03^{de}	0.14±0.07^{ef}	0.52±0.19^{e}	0.29±0.05^{d}	0.03±0.01^{ef}	−450.05±10.04^{b}	0.28±0.09^{abc}	0.96±0.38^{abc}	5.02±0.69^{a}	0.37±0.10^{ab}	0.05±0.01^{ab}
	30	10	−7.97±2.86^{a}	0.27±0.04^{cde}	0.16±0.07^{ef}	0.58±0.17^{de}	0.33±0.03^{bc}	0.04±0.00^{ef}	−468.62±36.29^{b}	0.25±0.07^{abc}	0.40±0.17^{bc}	1.07±0.12^{b}	0.34±0.09^{ab}	0.04±0.01^{ab}
	20	5	−5.46±1.22^{a}	0.29±0.01^{cde}	0.24±0.05^{def}	0.82±0.16^{de}	0.33±0.04^{b}	0.04±0.01^{def}	−15.45±16.58^{a}	0.35±0.08^{ab}	1.02±0.09^{abc}	2.79±0.88^{ab}	0.40±0.03^{ab}	0.05±0.01^{ab}
	20	7	−7.33±2.98^{a}	0.27±0.05^{cde}	0.18±0.10^{ef}	0.65±0.25^{de}	0.30±0.03^{cd}	0.04±0.01^{ef}	−298.96±17.04^{b}	0.31±0.07^{abc}	0.45±0.16^{bc}	1.41±0.20^{b}	0.38±0.09^{ab}	0.04±0.01^{ab}
	20	10	−7.80±0.01^{a}	0.29±0.03^{cde}	0.22±0.09^{def}	0.74±0.26^{de}	0.34±0.03^{bc}	0.04±0.00^{def}	−312.13±210.59^{ab}	0.27±0.10^{abc}	0.37±0.12^{c}	0.93±0.01^{b}	0.36±0.08^{ab}	0.04±0.01^{ab}
	16	5	−5.65±3.64^{a}	0.27±0.04^{e}	0.14±0.07^{f}	0.51±0.16^{de}	0.31±0.05^{bc}	0.04±0.00^{f}	−426.07±7.06^{ab}	0.21±0.01^{c}	0.61±0.32^{bc}	3.02±1.60^{b}	0.31±0.03^{b}	0.05±0.01^{b}
	16	7	−5.13±1.01^{a}	0.25±0.02^{de}	0.14±0.05^{ef}	0.54±0.16^{e}	0.31±0.01^{d}	0.04±0.00^{ef}	−473.44±5.23^{b}	0.21±0.00^{bc}	0.65±0.51^{abc}	3.11±2.44^{ab}	0.33±0.04^{ab}	0.01±0.01^{ab}
	16	10	−7.04±0.78^{a}	0.28±0.03^{cde}	0.22±0.05^{ef}	0.77±0.11^{de}	0.32±0.01^{bc}	0.04±0.01^{ef}	−445.50±5.46^{b}	0.36±0.01^{ab}	1.24±0.49^{a}	3.51±1.48^{ab}	0.48±0.00^{ab}	0.05±0.01^{ab}

注：同列不同小写字母代表不同处理组之间差异显著（P<0.05）。

进一步分析马铃薯制泥质地特性发现，30 mm×30 mm×10 mm 切块处理的红色马铃薯和紫色马铃薯蒸制 7~10 min 后，黏性、弹性、咀嚼性和胶着性均降低；20 mm×20 mm×10 mm 切块处理的红色马铃薯蒸制 7~10 min 后，质构特性均上升，而紫色马铃薯除黏性和胶着性上升外，弹性、咀嚼性、回复性和内聚性均下降；16 mm×16 mm×10 mm 切块处理的红色马铃薯蒸制 5~10 min 时，弹性、咀嚼性、胶着性和内聚性均下降，而紫色马铃薯仅弹性和内聚性下降。与煮制 5 min 相比，煮制 10 min 后 3 种切块大小的红色马铃薯和紫色马铃薯黏性均下降，但红色马铃薯内聚性上升；30 mm×30 mm×10 mm 和 20 mm×20 mm×10 mm 切块处理的紫色马铃薯随着煮制时间的延长，其弹性、咀嚼性、胶着性和内聚性均下降，而 16 mm×16 mm×10 mm 切块处理的弹性、咀嚼性、胶着性和内聚性均上升。

如表 6 所示，蒸煮时间和切块大小对红色马铃薯泥的黏性和咀嚼性影响较大，但对紫色马铃薯泥无影响。蒸制时间过短（3 min）无法有效制泥，而较长的蒸制时间（7~10 min）则能确保所有切块大小的马铃薯成功制泥。与蒸制相比，煮制处理能在较短时间内（5~10 min）保证马铃薯的制泥效果。蒸制处理时，较大的切块（30 mm×30 mm×10 mm）通常表现为质构下降较明显，而较小切块（16 mm×16 mm×10 mm）则能较好地保持部分质构特性。总体来看，蒸煮方式、切块大小和处理时间的合理搭配对制泥效果和马铃薯泥的质地有重要影响，这为马铃薯泥的工业化生产提供了理论依据。

表 6　不同因子对彩色马铃薯泥质构特性影响的三因素方差分析

Table 6　Three-factor variance analysis of the effects of different factors on the texture properties of colored mashed potato

因子	彩色马铃薯制泥后质构特性变化指标											
	红色马铃薯						紫色马铃薯					
	黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性	黏性/（Pa·s）	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性
A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.66	0.30	0.60	0.92	0.93
B	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.07	0.12	0.07	0.84	0.36	0.14	0.43
C	0.00	0.37	0.04	0.27	0.02	0.03	0.38	0.45	0.25	0.09	0.68	0.87
A×*B*	0.00	0.06	0.00	0.00	0.18	0.10	0.48	0.25	0.62	0.73	0.29	0.45
B×*C*	0.00	0.05	0.01	0.07	0.06	0.04	0.40	0.13	0.26	0.99	0.17	0.68
A×*C*	0.00	0.20	0.01	0.14	0.12	0.14	0.41	0.14	0.17	0.33	0.21	0.58
A×*B*×*C*	0.00	0.11	0.00	0.07	0.45	0.00	0.54	0.94	0.19	0.11	0.98	0.18

注：*A*：加工方式；*B*：切块长度；*C*：处理时间。

2.4　彩色马铃薯泥中淀粉颗粒观察

马铃薯加工过程中对淀粉结构的变化可反映其加工程度[23-25]。由图 1 可知，蒸煮处理 5 min 后，3 种切块大小的红色和紫色马铃薯泥中可观察到棱角圆润的卵圆形且轮纹结构明显的生淀粉粒。当蒸煮处理 7 min 后，所有切块的红色和紫色马铃薯泥中生淀粉粒开始消失，淀粉粒逐渐呈现糊化现象。当蒸煮处理时间延长至 10 min 时，淀粉粒进一步糊化，山脊状结构转变为结构松散、半透明的球状结构，这与相关的研究一致[26-28]。说明蒸煮时间越长，所有切块的彩色马铃薯泥中淀粉糊化程度越高。

2.5　彩色马铃薯泥中花青素质量分数变化

由表 7 可知，不同的蒸煮处理对红色马铃薯和紫色马铃薯泥中花青素质量分数产生了不同的影响。蒸制处理 7 min 时，与 30 mm×30 mm×10 mm 切块处理相比，20 mm×20 mm×10 mm 切块处理的红色马铃薯泥中花青素质量分数降低，而紫色马铃薯泥中花青素质量分数升高；随着蒸制时间由 5 min 延长至 10 min，16 mm×16 mm×10 mm 切块处理的红色马铃薯和紫色马铃薯泥中花青素质量分数呈先上升后下降的趋势。当煮制时间由 5 min 延长至 10 min 时，30 mm×30 mm×10 mm 切块处理的红色马铃薯泥中花青素质量分数呈上升趋势，

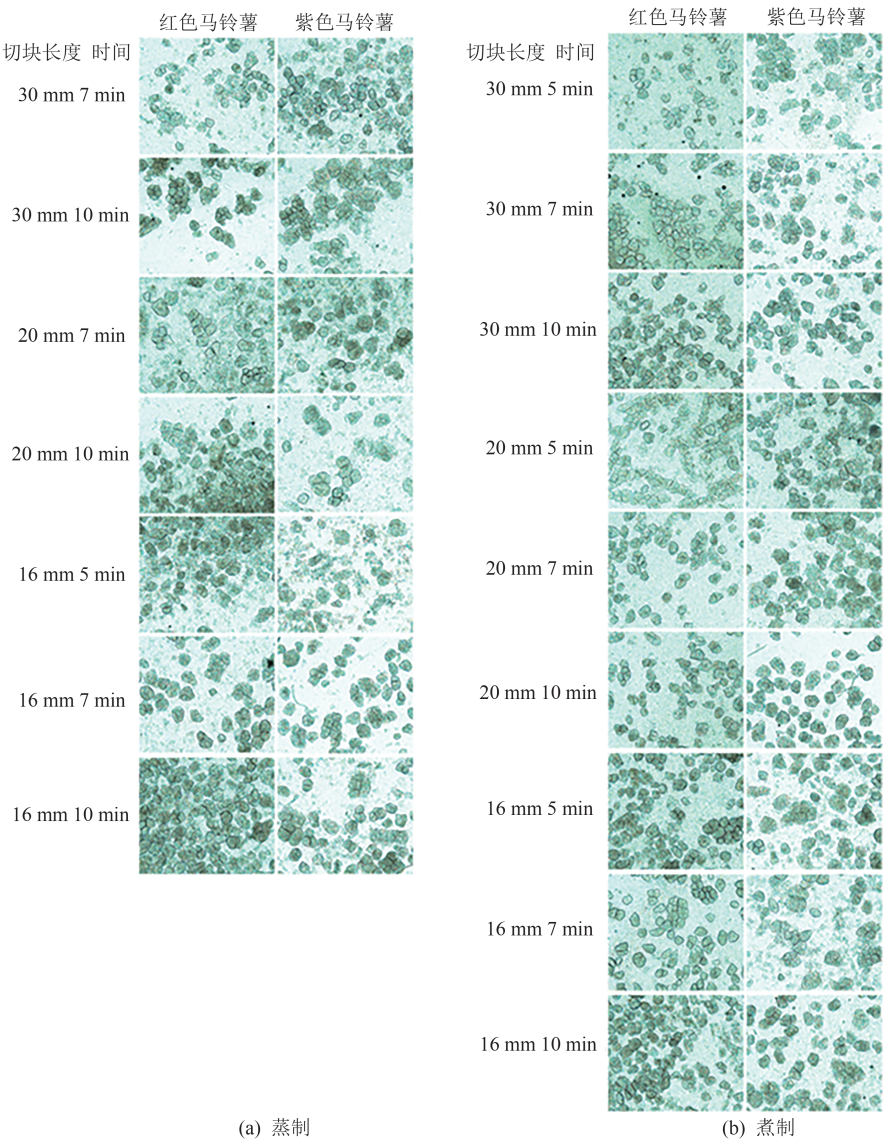


图 1　彩色马铃薯泥中淀粉结构变化

Fig. 1　Changes in starch structure of colored mashed potatoes with different cutting sizes

30 mm×30 mm×10 mm和16 mm×16 mm×10 mm切块处理的紫色马铃薯泥以及20 mm×20 mm×10 mm切块处理的红色马铃薯泥中花青素质量分数呈先上升后下降的趋势；20 mm×20 mm×10 mm切块处理的紫色马铃薯泥和16 mm×16 mm×10 mm切块处理的红色马铃薯泥中花青素质量分数呈下降趋势。

如表8所示，蒸煮时间和切块大小均影响彩色马铃薯的花青素质量分数。对于较小的马铃薯切块，花青素损失较小，推测与小切块的内部结构较为紧密有关，花青素损失量下降[29-30]。研究发现，蒸制未影响花青素质量分数变化，其原因是蒸制可使多酚氧化酶、过氧化物酶和糖苷酶失活，有利于降低花青素降解率[31-33]。而煮制会导致花青素质量分数下降，是由于煮制会导致花青素流失到水中，进而降低其质量分数[34-36]。推测在蒸煮过程中，花青素的损失受蒸煮时间长短和切块大小的影响。蒸制可能通过使多酚氧化酶等酶类失活，减少花青素的分解；而煮制则可能通过花青素的溶出导致其流失，从而降低花青素的保留率。因此，在确保花青素的降解量最小化的前提下，建议采取较长时间的蒸煮过程，并优先选用体积较小的块茎，可在保持较高花青素质量分数的同时，最大程度减少花青素的降解。

表 7 彩色马铃薯泥花青素质量分数变化

Table 7 Changes in the mass fraction of anthocyanins in colored mashed potatoes

加工方式	切块长度/mm	时间/min	红色马铃薯花青素质量分数/(mg/kg)	紫色马铃薯花青素质量分数/(mg/kg)
蒸制	30	7	32.39±0.49^{e}	14.70±0.44^{j}
	30	10	25.87±0.35^{h}	26.33±0.70^{de}
	20	7	18.30±0.44^{j}	14.10±0.91^{j}
	20	10	16.60±0.11^{k}	32.27±0.83^{b}
	16	5	17.33±0.24^{k}	23.26±2.03^{fg}
	16	7	24.01±0.79^{i}	27.90±0.80^{cd}
	16	10	11.42±0.20^{l}	19.37±0.46^{i}
煮制	30	5	31.36±0.87^{f}	24.90±1.78^{ef}
	30	7	41.36±0.70^{b}	40.77±1.66^{a}
	30	10	48.00±0.32^{a}	21.66±0.45^{gh}
	20	5	28.34±0.56^{g}	23.45±0.54^{fg}
	20	7	38.51±1.35^{c}	20.36±0.85^{hi}
	20	10	25.78±0.09^{h}	19.89±1.25^{hi}
	16	5	40.42±0.31^{b}	25.46±0.81^{e}
	16	7	33.84±0.25^{d}	29.11±1.54^{c}
	16	10	29.11±0.44^{g}	24.48±1.51^{ef}

注:同列不同小写字母代表不同处理之间差异显著(P<0.05)。

表 8 不同因子对彩色马铃薯泥花青素质量分数影响的三因素方差分析

Table 8 Three-factor variance analysis of the effects of different factors on the mass fraction of anthocyanins in colored mashed potato

因子	制泥后彩色马铃薯泥花青素质量分数变化指标											
	红色马铃薯						紫色马铃薯					
	黏性/(Pa·s)	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性	黏性/(Pa·s)	弹性/N	咀嚼性/N	胶着性/N	内聚性	回复性
A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.66	0.30	0.60	0.92	0.93
B	0.00	0.04	0.00	0.00	0.03	0.07	0.12	0.07	0.84	0.36	0.14	0.43
C	0.00	0.37	0.04	0.27	0.02	0.03	0.38	0.45	0.25	0.09	0.68	0.87
A×*B*	0.00	0.06	0.00	0.00	0.18	0.10	0.48	0.25	0.62	0.73	0.29	0.45
B×*C*	0.00	0.05	0.01	0.07	0.06	0.04	0.40	0.13	0.26	0.99	0.17	0.68
A×*C*	0.00	0.20	0.01	0.14	0.12	0.14	0.41	0.14	0.17	0.33	0.21	0.58
A×*B*×*C*	0.00	0.11	0.00	0.07	0.45	0.00	0.54	0.94	0.19	0.11	0.98	0.18

注:*A*:加工方式;*B*:切块长度;*C*:处理时间。

3 结论

探讨了2种马铃薯泥加工方式(蒸制/煮制)、3种切块大小(30 mm×30 mm×10 mm、20 mm×20 mm×10 m、16 mm×16 mm×10 mm)以及4个处理时间(3、5、7、10 min)对红色和紫色马铃薯泥加工前后色泽、花青素、品质和质地的影响。研究结果表明,煮制比蒸制方式更易导致马铃薯的硬度、黏性、咀嚼性和胶着性迅速下降,且随着切块大小的减小,其硬度、黏性、咀嚼性和胶着性下降的速度也愈加明显。此外,蒸煮时间对彩色马铃薯的色泽、花青素质量分数及淀粉糊化程度具有显著影响。为了确保加工后马铃薯泥中保持较高的花青素质量分数和良好的色泽,建议蒸煮时间控制在7 min。因此最优加工条件为:选择煮制方式、较小的薯块大小(16 mm× 16 mm× 10 mm)以及适中的处理时间(约7 min)。这一工艺组合能够显著改善彩色马铃薯泥的质地和营养价值。尽管本研究确定了最

佳的蒸煮时间和切块大小，但对于其他加工条件，如温度变化、品种的影响等尚未进行深入探讨。此外，虽然花青素和质地方面的结果较为理想，但未能深入探讨其他抗氧化物质的变化及其对健康的潜在益处。本研究为彩色马铃薯泥的工业化加工提供了理论依据，并为优化加工工艺、提高产品质量提供了指导。

参考文献

[1] LI L X，ZHU T T，WEN L N，et al. Biofortification of potato nutrition[J]. Journal of Advanced Research，2025，75：23-34.

[2] 高严，张琳，邓博文，等. 不同品种马铃薯全粉蛋白质、氨基酸和矿质元素营养成分差异研究[J]. 科技通报，2024，40(7)：1-7，20.
GAO Y，ZHANG L，DENG B W，et al. Study on natritional composition difference of the protein，amino acids and minerals contents in potato varieties [J]. Bulletin of Science and Technology，2024，40(7)：1-7，20.(in Chinese)

[3] 吕巨智，染和，姜建初. 马铃薯的营养成分及保健价值[J]. 中国食物与营养，2009，15(3)：51-52.
LV J Z，RAN H，JIANG J C. Nutrients and health value of potato[J]. Food and Nutrition in China，2009，15(3)：51-52.(in Chinese)

[4] 王世光，吕黄珍，卢天齐，等. 我国马铃薯加工业发展现状及建议[J]. 农业工程，2022，12(3)：76-79.
WANG S G，LV H Z，LU T Q，et al. Current situation and suggestions of potato processing industry in China [J]. Agricultural Engineering，2022，12(3)：76-79.(in Chinese)

[5] EDWARDS C G，ENGLAR J W，BROWN C R，et al. Changes in color and sugar content of yellow-fleshed potatoes stored at three different temperatures [J]. American Journal of Potato Research，2002，79(1)：49-53.

[6] HAN L，LI R J，JIN X Y，et al. Metabolomic analysis，extraction，purification and stability of the anthocyanins from colored potatoes[J]. Food Chemistry X：2024，22：101423.

[7] SAMPAIO S L，LONCHAMP J，DIAS M I，et al. Anthocyanin-rich extracts from purple and red potatoes as natural colourants：bioactive properties，application in a soft drink formulation and sensory analysis [J]. Food Chemistry，2021，342：128526.

[8] XUE H K，ZHA M，TANG Y Q，et al. Research progress on the extraction and purification of anthocyanins and their interactions with proteins[J]. Molecules，2024，29(12)：2815.

[9] NIEVA F S，ROS O P. Preparation and freezing of mashed taniers[J]. The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico，1977，61(4)：507-508.

[10] 蔡雪梅，彭毅秦，何莲，等. 不同品种马铃薯炒制加工品质的评价[J]. 食品工业科技，2021，42(22)：283-289.
CAI X M，PENG Y Q，HE L，et al. Quality evaluation of different potato varieties after stir-frying processing[J]. Science and Technology of Food Industry，2021，42(22)：283-289.(in Chinese)

[11] HU H，ZHOU X Y，WANG Y S，et al. Effects of particle size on the structure，cooking quality and anthocyanin diffusion of purple sweet potato noodles [J]. Food Chemistry X：2023，18：100672.

[12] ENARU B，DREȚCANU G，POP T D，et al. Anthocyanins：factors affecting their stability and degradation[J]. Antioxidants，2021，10(12)：1967.

[13] OANCEA S. A review of the current knowledge of thermal stability of anthocyanins and approaches to their stabilization to heat[J]. Antioxidants，2021，10(9)：1337.

[14] 王滋，雷桥，张文惠. 两段阶梯加热成膜工艺对蛋白基复合材料疏水性和阻隔性能的影响[J]. 食品与机械，2024，40(1)：3-10.
WANG Z，LEI Q，ZHANG W H. Effects of two-step heating process on hydrophobicity and barrier properties of protein-based composites [J]. Food & Machinery，2024，40(1)：3-10.(in Chinese)

[15] 肖继坪，吴晓杰，邓声翠，等. 7个彩色马铃薯品种抗氧化性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(4)：16-24.
XIAO J P，WU X J，DENG S C，et al. Antioxidation of seven pigmented potato cultivars [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2023，51(4)：16-24.(in Chinese)

[16] 谷如祥，冯淑贞，刘聪慧，等. 8种彩色马铃薯中花青素含量测定及其在贮藏过程中的含量变化研究[J]. 食品安全质量检测学报，2024，15(24)：239-247.
GU R X，FENG S Z，LIU C H，et al. Determination of anthocyanin content in 8 kinds of colored *Solanum tuberosum* L. varieties and its changes during storage[J]. Journal of Food Safety and Quality，2024，15(24)：239-247.(in Chinese)

[17] 简华斌，杜志龙，张克，等. 马铃薯泥加工技术及发展现状[J]. 农业工程，2022，12(10)：50-55.
JIAN H B，DU Z L，ZHANG K，et al. Processing technology and development status of mashed potato[J]. Agricultural Engineering，2022，12(10)：50-55.(in Chinese)

[18] 王含，王鹏，段玉敏，等. 蒸煮处理对马铃薯全粉细胞结构及消化特性的影响[J]. 食品工业科技，2022，43(7)：87-93.

WANG H，WANG P，DUAN Y M，et al. Effect of cooking treatment on cell structure and digestive characteristics of whole potato flour[J]. Science and Technology of Food Industry，2022，43(7)：87-93.(in Chinese)

[19] 周中帆，丁德玥，张沛枫，等. 色差仪与DigiEye对预制蔬菜颜色的表征[J]. 食品研究与开发，2019，40(23)：1-8.
ZHOU Z F，DING D Y，ZHANG P F，et al. The color detection of colorimeter and DigiEye on prefabricated vegetable[J]. Food Research and Development，2019，40(23)：1-8.(in Chinese)

[20] 王健，刘媛，宋萌萌，等. 3种不同切割方式烤制马铃薯质构及淀粉消化特性研究[J]. 农产品加工，2024(16)：26-29，36.
WANG J，LIU Y，SONG M M，et al. Study on texture and starch digestion characteristics of baked potato with three different cutting methods[J]. Farm Products Processing，2024(16)：26-29，36.(in Chinese)

[21] OLIVEIRA T F，LEIBOWITZ M P，LEAL C A G. Local epidemiological cutoff values and antimicrobial susceptibility profile for Brazilian *Francisella orientalis* isolates[J]. Aquaculture，2022，553：738054.

[22] 罗佳燕，徐菲菲，刘飞，等. 蒸煮方式对红豆全豆豆沙品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43(6)：11-20.
LUO J Y，XU F F，LIU F，et al. Effect of cooking methods on the quality of whole adzuki bean paste[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2024，43(6)：11-20.(in Chinese)

[23] ZHOU T T，ZHANG Y C，WANG Y H，et al. Impact of freeze-thaw cycles on the physicochemical properties and structure-function relationship of potato starch with varying granule sizes in frozen dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，279：134864.

[24] XIONG S G，ZHOU F H，LI W，et al. Effects of ascorbic acid treatment on starch metabolism during wound healing in fresh-cut potatoes[J]. Carbohydrate Polymers，2025，352：123169.

[25] ZHENG Y，LI M Y，HAO S Y，et al. Effect of ultrasonic treatment on the structure and functional properties of protein-fortified potato powder[J]. LWT-Food Science and Technology，2024，214：117098.

[26] 王林. 淀粉的糊化与凝胶特性及食用品质研究[J]. 保鲜与加工，2021，21(2)：67-73.
WANG L. Study on gelatinization and gelation characteristics of starches and their edible qualities[J]. Storage and Process，2021，21(2)：67-73.(in Chinese)

[27] RILEY I M，VERMA U，CANALS ROVIRA S，et al. Impact of potato starch structural transitions on microstructure development during deep-frying[J]. Food Hydrocolloids，2023，142：108833.

[28] HOOYBERGHS K，BAI Y M，NOENS L，et al. Impact of calcium-starch interactions on the textural and oil absorption properties of deep-fried potato mashes[J]. Food Hydrocolloids，2024，156：110344.

[29] ZHANG X Y，WU Z Q，LIU X X，et al. Removal of internal lipids enhances the effect of proanthocyanidins on maize starch retrogradation[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，283：137025.

[30] 崔海鹏，郭健龙，王大全，等. 花青素加工稳定性及其研究进展[J]. 食品与发酵工业，2024，50(13)：388-397.
CUI H P，GUO J L，WANG D Q，et al. Stability of anthocyanins during processing and research progress[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(13)：388-397.(in Chinese)

[31] MANZOOR M F，XU B，KHAN S，et al. Impact of high-intensity thermosonication treatment on spinach juice：bioactive compounds，rheological，microbial，and enzymatic activities[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2021，78：105740.

[32] XIN Y，LIU Z Z，ZHANG Y W，et al. Effect of temperature fluctuation on colour change and softening of postharvest sweet cherry[J]. RSC Advances，2021，11(37)：22969-22982.

[33] MODESTO J E N，CHAVES R P F，MARTINS M G，et al. Phenolic compounds stability of grumixama (*Eugenia brasiliensis*) juice during processing and storage[J]. Beverages，2023，9(4)：91.

[34] CORDEIRO T，FERNANDES I，PINHO O，et al. Anthocyanin content in raspberry and elderberry：the impact of cooking and recipe composition[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science，2021，24：100316.

[35] GONZÁLEZ-LÁZARO M，SÁENZ DE URTURI I，MARÍN-SAN ROMÁN S，et al. Effects of foliar applications of methyl jasmonate alone or with urea on anthocyanins content during grape ripening[J]. Scientia Horticulturae，2024，338：113782.

[36] HU Y Q，TANG Q Y，SUN Y，et al. Comparative study on physicochemical，nutritional and cooking properties of different pigmented dehusked rice varieties influenced by superheated steam treatment[J]. Journal of Cereal Science，2024，117：103934.

（责任编辑：李春丽）