姜太玲, 段春芳, 宋记明, 等. 生长期对不同食用木薯粉品质特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 303−313. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040190

JIANG Tailing, DUAN Chunfang, SONG Jiming, et al. Effect of Growing Period on Quality Characteristics of Different Edible Cassava Flours[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 303−313. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040190

· 分析检测 ·

生长期对不同食用木薯粉品质特性的影响

姜太玲[1], 段春芳[1], 宋记明[1], 张林辉[1], 肖明昆[1], 李月仙[1], 白丽娜[1], 沈正松[1], 熊贤坤[1], 刘　倩[1], 刘光华[2,*], 严　炜[1,*]

（1.云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所/热带作物生物育种全国重点实验室, 云南保山 678000;
2.云南省农业科学院国际农业研究所, 云南昆明 650205）

摘　要: 为了解不同收获期的食用木薯粉品质变化，本研究以不同生长期（8 月、9 月、10 月、11 月、12 月）的‘华南 205’（SC205）、‘桂热 891’（GR891）、‘华南 9 号’（SC9）3 种食用木薯粉为研究对象，测定了其营养成分含量和加工特性，并对品质进行了相关性分析、聚类分析和加工食品适配性探讨。结果表明，SC205、GR891、SC9 木薯粉的营养成分含量和加工特性随着生长期的延长呈现不同的变化趋势，其中 SC9 木薯粉在 11 月的淀粉含量最高、粗纤维含量最低，分别为 77.63%、0.70%，GR891 木薯粉在 9 月的蛋白质含量最高，为 5.26%。在 3 种食用木薯粉中，SC9 木薯粉的体积密度、吸水能力、吸油能力、溶解度、膨胀度、透光率、冻融稳定性（用析水率表示）分别在 11 月、10 月、11 月、12 月的 85 ℃、10 月的 95 ℃、11 月、12 月达到最大值，分别为 0.78 g/mL、127.36%、3.20 mL/g、46.25%、27.27%、13.10%、37.23%。3 种木薯粉的营养成分含量与加工特性之间存在不同程度的相关性，对不同生长期的 3 种木薯粉进行聚类分析，划分为了 4 个类群，对营养成分和加工特性进行聚类分析，划分为了 3 个类群。将不同生长期的木薯粉进行食品加工适配性探讨，为确定木薯最佳采收期及开发多样化木薯产品提供了理论依据。

关键词: 木薯粉, 生长期, 品种, 品质, 相关性, 聚类分析, 食品加工

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0303−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040190　　本文网刊:

Effect of Growing Period on Quality Characteristics of Different Edible Cassava Flours

JIANG Tailing[1], DUAN Chunfang[1], SONG Jiming[1], ZHANG Linhui[1], XIAO Mingkun[1], LI Yuexian[1], BAI Lina[1], SHEN Zhengsong[1], XIONG Xiankun[1], LIU Qian[1], LIU Guanghua[2,*], YAN Wei[1,*]

（1.Tropical and Subtropical Cash Crops Research Institute, Yunan Academy of Agricultural Sciences/National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding, Baoshan 678000, China;
2.International Agricultural Research Institute, Yunan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China）

Abstract: To investigate the quality changes of edible cassava flour at different stages of harvesting (from August to December), this study selected three types of edible cassava flour (SC205, GR891, and SC9) prepared from samples obtained at different period of growth, and measured their nutrient content and processing characteristics. In addition, this study conducted correlation analysis and cluster analysis, and assessed the suitability of the flours for processed food products. The results revealed that the nutrient contents and processing characteristics of the three cassava flours showed different trends with an extension of the growing period. Specifically, SC9 cassava flour had the highest starch content and

收稿日期: 2025−04−17

基金项目: 国家木薯产业技术体系保山综合试验站（CARS-11-YNLGH）; 云南省李开绵专家工作站（202305AF150004）。

作者简介: 姜太玲（1989−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: ynjiangtailing@163.com。

*** 通信作者:** 刘光华（1970−）, 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 作物资源研究, E-mail: rjslgh@vip.126.com。

严炜（1984−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 遗传育种, E-mail: rjsyanwei@163.com。

the lowest crude fiber content in November (77.63% and 0.70%, respectively), whereas GR891 cassava flour had the highest protein content in September, reaching 5.26%. Among the three types of edible cassava flour, the SC9 type showed the best performance in terms of bulk density, water absorption capacity, oil absorption capacity, solubility, swelling capacity, light transmittance, and freeze-thaw stability (expressed in terms of water separation rate) under the following conditions: Bulk density peaked at 0.78 g/mL in November, water absorption capacity was highest at 127.36% in October, oil absorption capacity reached a maximum of 3.20 mL/g in November, solubility was optimal at 46.25% in December at 85 ℃, swelling capacity was highest at 27.27% in October at 95 ℃, light transmittance peaked at 13.10% in November, and the best water separation rate (37.23%) was obtained in December. There were varying degrees of correlation between the nutrient content and processing characteristics of the three types of cassava flour, which were classified into four groups at different growth periods based on cluster analysis, whereas nutrient contents and processing characteristics were classified into three groups. Furthermore, this study examined the suitability of cassava flour at different growth periods for food processing, and established that this flour has a potentially broad range of applications, including in the production of staple foods, snacks, and instant foods. This study will provide a theoretical basis for determining the optimal harvest time of cassava and developing diverse cassava-based products.

Key words: cassava flour; growing period; variety; quality; correlation; cluster analysis; food processing

木薯(*Manihot esculenta* Crantz)作为热带和亚热带地区重要的粮食安全作物[1],为全球超过 10 亿人口提供了主要的食物来源[2],尤其是热带国家农村低收入人群的重要主食[3]。木薯块根营养价值高,富含碳水化合物(干基含量 80%~90%)[4],并因其天然无麸质特性成为乳糜泻患者的重要主食替代品[5−6],使其在食品工业中具有重要的应用价值。

木薯块根通过加工成木薯粉可延长货架期,而木薯粉品质的形成受品种、加工工艺等多方面因素的影响。前人研究主要集中在木薯品种和加工处理对木薯粉品质的影响上。苏键等[7]对 5 种中泰木薯粉品质的研究发现,中国木薯粉的淀粉含量、体积密度均低于泰国木薯粉的淀粉含量、体积密度,泰国木薯粉的蛋白质、灰分、脂肪含量均低于中国木薯粉相应成分的含量。通过对‘华南 9 号’木薯粉进行挤压膨化处理,可导致淀粉结晶度的损失,促进木薯粉中淀粉的水解[8];采用 γ 射线辐照木薯片制备的木薯粉,其溶解度随着辐照剂量的增加而增加,膨胀度、糊化粘度则降低[9];利用脉冲电场对木薯粉进行处理,与天然木薯粉相比,在处理过的木薯粉悬浮液中发现较高丰度的顶空挥发物[10];通过对木薯粉进行干湿热、蒸汽湿热处理,均能提高膨胀度[5,11]。此外,有研究报道,不同品种和同一品种的木薯淀粉品质在不同生长期具有差异性[12−13],而木薯粉作为木薯产品的加工原料,其品质随生长期的动态变化直接影响加工特性和终端产品品质。

因此,本研究以 3 个食用木薯品种为试验材料,分析 8~12 月份收获木薯块根制备所得木薯粉的营养成分含量和加工特性变化,并对品质进行相关性分析、聚类分析和加工食品适配性探讨,为确定木薯最佳采收期、优化木薯粉加工工艺及开发多样化木薯产品提供理论依据,对打破传统“唯产量论”的采收策略及提升木薯产业链附加值具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

木薯　品种‘华南 205’(SC205)、‘桂热 891’(GR891)、‘华南 9 号’(SC9),取自云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所木薯试验基地。木薯种茎于 2022 年 4 月 4 日种植,采用随机区组设计,株行距为 0.8 m×1.0 m,每个品种 3 个重复,每个小区种植 28 株,田间管理按常规进行。分别在 8、9、10、11、12 月份进行收获,每个小区选择 5 株长势均匀的植株,将块根全部挖出进行试验;食用油　市购。

PL203 电子天平　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;TGL-16aB 台式高速离心机　上海安亭科学仪器厂;GZX-9146MBE 电热鼓风干燥箱　上海博迅实业有限公司医疗设备厂;Direct-Q® 8 UV-R 超纯水系统　美国 Millipore 公司;V-5000 可见分光光度计　上海元析仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　木薯粉的制备　参考林立铭等[14]方法,并做一定修改。将鲜木薯削去内外皮,清洗干净后切成 2 mm 薄片,经太阳晒干(含水量约 11%)后粉碎,过 120 目筛得木薯粉。

1.2.2　木薯粉的营养成分测定　淀粉含量参照 GB 5009.9-2016《食品安全国家标准 食品中淀粉含量的测定》;粗纤维含量参照 GB/T 5009.10-2003《植物类食品中粗纤维的测定》;蛋白质含量参照 GB5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》。

1.2.3　木薯粉的加工特性测定

1.2.3.1　体积密度的测定　参考仇干等[15]的方法。取 5 g 样品于 10 mL 量筒中,持续轻敲量筒使样品体积恒定,记录样品体积,按式(1)计算体积密度。

$$\text{体积密度(g/mL)} = \frac{W}{V} \qquad \text{式(1)}$$

式中,W 为样品质量,g;V 为样品恒定后的体积,mL。

1.2.3.2　吸水性的测定　参考仇干等[15]的方法,并做一定修改。取 0.6 g 样品和 9 mL 去离子水于 10 mL 干燥的离心管中混匀,室温下振荡 1 h,4000 r/min 离

心 15 min，去上清液后称量沉淀物和离心管的质量，以吸水能力(%)表示吸水性，按式(2)计算吸水性。

$$吸水能力(\%)=\frac{W_1-W_0-W}{W}\times 100 \qquad 式（2）$$

式中，W_1 为离心后的沉淀物和离心管质量，g；W_0 为离心管的质量，g；W 为样品质量，g。

1.2.3.3　吸油性的测定　参考吴立根等[16]的方法，并做一定修改。取 0.3 g 样品于离心管中，加入 5 mL 食用油混匀后置于室温下振荡 30 min，4000 r/min 离心 15 min，测量上清液的体积，原始食用油体积减去上清液体积即为样品的吸油量，吸油性为每克样品吸收食用油的毫升数，按式(3)计算吸油性。

$$吸油性(mL/g)=\frac{5-V}{W} \qquad 式（3）$$

式中，V 为离心后的上清液体积，mL；W 为样品质量，g。

1.2.3.4　溶解性和膨胀度的测定　参考刘婷婷等[17]的方法，并做一定修改。将 0.2 g 样品和 10 mL 去离子水加入 15 mL 离心管中，分别在 65、75、85、95 ℃ 的水浴锅中加热 30 min，加热过程中间歇性摇晃，冷却至室温后以 3000 r/min 的转速离心 20 min，将上清液倒入培养皿中干燥至恒重，称量干燥残留物质量，按式(4)计算样品溶解度。称量离心后离心管中剩余的沉淀物质量，按式(5)计算样品膨胀度。

$$溶解度(\%)=\frac{W_1}{W}\times 100 \qquad 式（4）$$

$$膨胀度(\%)=\frac{W_2}{W\times(100-S)}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中，W_1 为上清液干燥至质量恒重后的质量，g；W 为样品质量，g；W_2 为离心后的沉淀物质量，g；S 为样品的含水量，%。

1.2.3.5　透光率的测定　参考任瑞林等[18]的方法，并做一定修改。将 0.1 g 样品和 10 mL 去离子水加入 15 mL 离心管中后置于 95 ℃ 水中加热 30 min，并不断振荡，冷却至室温后以去离子水作空白，用分光光度计在 640 nm 处测定样品透光率。

1.2.3.6　冻融稳定性的测定　参考郭爱良等[19]的方法，并做一定修改。配制质量分数 6% 的样品溶液，95 ℃ 水浴 30 min，并不断振荡，冷却至室温称量糊重，然后将样品放入−18 ℃ 冰箱中冻藏 24 h，然后室温下解冻，在 3000 r/min 条件下离心 20 min，弃去上清液(若无水析出则反复冻融，至有水析出)，称沉淀物质量，以析水率表示冻融稳定性，按式(6)计算析水率。

$$析水率(\%)=\frac{W_1-W_2}{W_1}\times 100 \qquad 式（6）$$

式中，W_1 为糊重，g；W_2 为离心后的沉淀物质量，g。

1.3　数据处理

每组实验均设置 3 个重复，采用 Microsoft Excel 2007 整理各品质数据。利用 SPSS 20.0 软件做无量纲标准化处理，进行单因素方差分析，Duncan 法进行多重比较，$P<0.05$ 表示差异显著；利用 GraphPad Prism v8.0.2.263 软件绘图，Origin 2021 软件进行聚类热图分析。

2　结果与分析

2.1　木薯粉的营养成分

生长期对 3 个品种木薯粉的淀粉、粗纤维和蛋白质含量的影响见表 1。由表 1 可知，不同品种木薯粉的各营养物质含量变化呈现特异性。随着生长期延长，3 种木薯粉的淀粉含量呈不同的变化趋势，SC205、GR891、SC9 木薯粉的淀粉含量分别在 9 月份、12 月份和 11 月份达到最大值，不同木薯品种的淀粉含量达到最大值时需要的生长期不一样，这与林莹等[20]报道的一致；SC205、GR891 木薯粉的淀粉含量均在 9 月份还出现一个峰值，分别与 11 月份、12 月份的淀粉含量无显著性差异($P>0.05$)，SC9 木薯粉的淀粉含量在 8 月份的含量仅比 11 月份低 4.77%，显著高于其他月份($P<0.05$)，这可能是由于木薯块根形成至膨大期，光合作用形成的碳水化合物转化成淀粉的速度较快，所以较其他月份含量较高[21]，而块根接近成熟时，地上部分的叶片大大减少，

表 1　生长期对木薯粉营养成分的影响

Table 1　Effect of growing periods on nutrient contents of cassava flours

品种	指标	生长期				
		8月	9月	10月	11月	12月
SC205	淀粉(%)	67.03±1.32^{c}	75.30±1.13^{a}	69.70±1.41^{b}	73.60±0.89^{a}	69.90±1.31^{b}
	粗纤维(%)	1.67±0.06^{a}	1.27±0.06^{b}	1.17±0.06^{c}	0.90±0.00^{d}	0.80±0.00^{e}
	蛋白质(%)	4.31±0.07^{c}	4.86±0.08^{b}	4.83±0.08^{b}	4.80±0.08^{b}	5.17±0.10^{a}
GR891	淀粉(%)	66.83±0.96^{bc}	74.30±1.93^{a}	64.53±1.23^{c}	68.23±1.16^{b}	75.87±1.27^{a}
	粗纤维(%)	1.37±0.06^{a}	0.90±0.00^{c}	0.80±0.00^{d}	0.90±0.00^{c}	1.07±0.06^{b}
	蛋白质(%)	4.80±0.05^{b}	5.26±0.10^{a}	5.21±0.09^{a}	4.91±0.07^{b}	4.86±0.09^{b}
SC9	淀粉(%)	73.93±1.80^{b}	65.43±0.70^{c}	58.10±0.95^{d}	77.63±1.59^{a}	65.93±1.45^{c}
	粗纤维(%)	2.57±0.12^{a}	2.23±0.12^{b}	1.23±0.06^{c}	0.70±0.00^{e}	0.90±0.00^{d}
	蛋白质(%)	2.77±0.07^{c}	2.73±0.07^{c}	2.75±0.05^{c}	4.27±0.06^{b}	4.79±0.08^{a}

注：同行数据肩标小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)，同行数据肩标小写字母相同表示差异不显著($P>0.05$)。

块根利用叶中转运来的蔗糖提供能量和原料，积累合成较多的淀粉类物质[13]，SC205、SC9 木薯粉的淀粉含量在 12 月份出现下降趋势，可能是由于 12 月份的温度降低和水分减少，木薯块根中的淀粉转化为了可溶性糖[22]。

随着生长期延长，3 种木薯粉的粗纤维含量均整体呈下降趋势，可能是淀粉、蛋白质等物质的积累导致粗纤维在木薯粉干重中的相对比例下降，这与甘薯中的‘徐薯 22’、‘徐薯 18’在生育期内的纤维素含量变化趋势一致[21]，在 12 月份采收时的粗纤维含量与周宾等[23] 报道的基本一致。

随着生长期延长，SC205、SC9 木薯粉的蛋白质含量呈上升趋势，GR891 木薯粉的蛋白质含量呈现先上升后下降的趋势，可能是在木薯块根发育过程中，有色体功能激活，大量合成与代谢相关的蛋白质，总体上提高了蛋白质含量[24]；因品种差异，GR891 木薯粉的蛋白质含量在 10 月份出现下降，可能是在生育后期，光合产物优先用于淀粉合成。

2.2 木薯粉的加工特性

2.2.1 体积密度 粉末的体积密度受到颗粒大小、颗粒间静电力和范德华力等因素的影响，这对于粉末在包装、储存和运输过程具有重要的意义[25]。木薯粉的体积密度因生长期、品种的不同有所差异。由图 1A 可知，不同生长期的 SC205 木薯粉的体积密度在 0.73~0.75 g/mL，呈差异性不显著（$P>0.05$），GR891、SC9 木薯粉的体积密度随着生长期延长呈现先上升后下降再升高并趋于稳定的趋势，分别在 12 月份、11 月份达到最高，这可能是在块根成熟后期，光合产物从叶到根的分配加速，大量碳水化合物合成并转移到块根并趋于稳定，导致体积密度增加[26]。由图 1B 可知，在 8 月、9 月、10 月，3 种木薯粉的体积密度均无显著性差异（$P>0.05$）；在 11 月、12 月，SC205 木薯粉的体积密度均显著低于 SC9 木薯粉的相应月份（$P<0.05$），GR891 与 SC9 则均无显著性差异（$P>0.05$）。可见，不同生长期的 3 种木薯粉在体积密度上呈现特异性。不同生长期的 3 种木薯粉的体积密度在 0.71~0.78 g/mL 范围，高于木薯样品 CCF-A（0.48 g/mL）和 CCF-B（0.46 g/mL）的体积密度[7]，处于 Chimphepo 等[1] 报道的范围内（0.65~0.85 g/mL），高于低筋小麦粉的体积密度（0.56 g/mL）[7]。

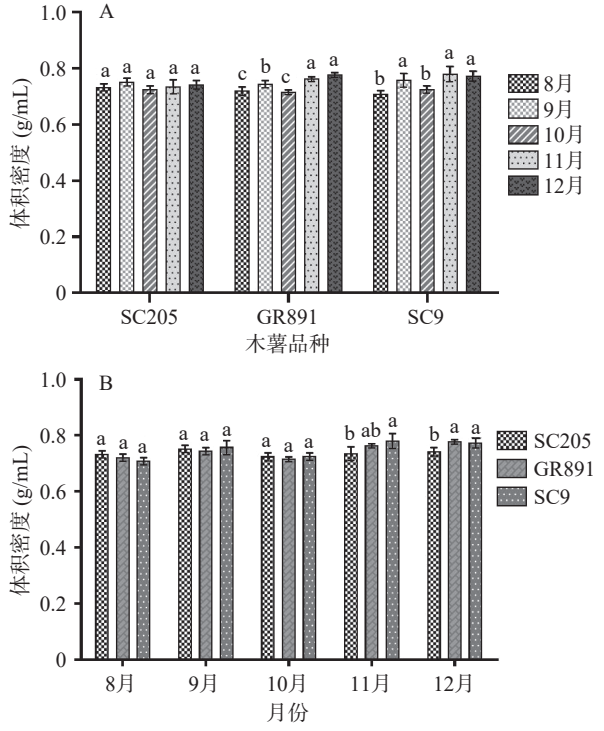


图 1 生长期对木薯粉体积密度的影响

Fig.1 Effect of growing periods on bulk density of cassava flours

注：同簇数据标注小写字母不同表示差异显著（$P<0.05$），同簇数据标注小写字母相同表示差异不显著（$P>0.05$）；图 2~图 9 同。

2.2.2 吸水性 面粉的吸水能力是在淀粉和蛋白质分子与水分子产生亲水性相关作用时获得[4]，是评估食品最大吸水量及其保水性能的指标[27]，样品的收获时间、品种差异均会影响其吸水能力[27]。3 种木薯粉的吸水性在不同生长期变化趋势一致，呈现先下降后上升再下降的趋势，见图 2A，在不同生长期中，SC205 木薯粉的吸水能力在 8 月最大（117.77%），GR891、SC9 木薯粉的吸水能力均在 10 月达到最大值，分别为 122.58%、127.36%；由图 2B 可知，SC9 木薯粉在不同生长期的吸水能力均高于 SC205、GR891 木薯粉，GR891 木薯粉在不同生长期的吸水能力均高于 SC205 木薯粉。这可能与不同生长期的木薯粉中的淀粉和蛋白质含量有关[25]，蛋白质与淀粉

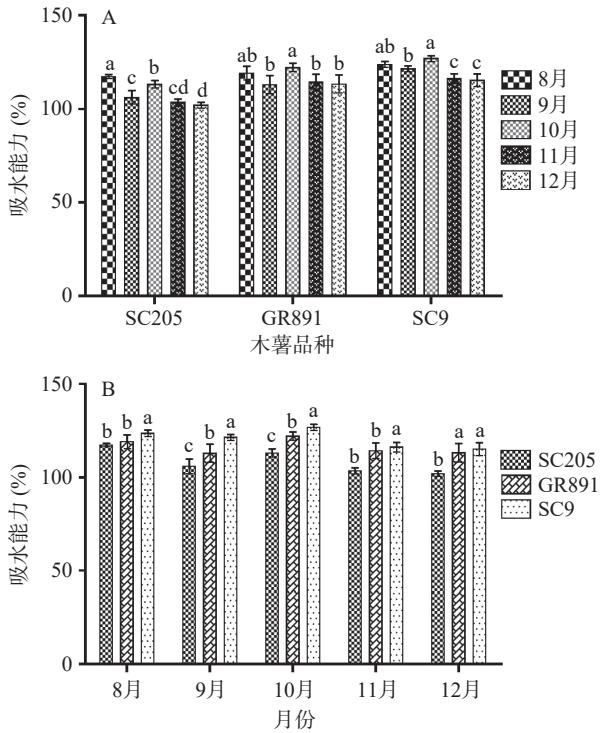


图 2 生长期对木薯粉吸水能力的影响

Fig.2 Effect of growing periods on water absorption capacity of cassava flours

的纠缠会抑制淀粉颗粒的膨胀，影响吸水性[1]。

2.2.3　吸油性　吸油性是衡量面粉和淀粉保持风味能力的一个重要参数[27]，对面团的塑性和外观有很大影响[28]。SC205、GR891 木薯粉的吸油性在不同生长期变化趋势一致，呈现先降低后上升再下降的趋势，SC9 木薯粉则呈现先升高后降低的趋势，见图 3A。在不同生长期中，SC205 木薯粉的吸油能力在 10 月最大（2.66 mL/g），GR891 木薯粉的吸油能力无显著性差异（P>0.05），吸油能力在 1.76~2.21 mL/g 范围，SC9 木薯粉的吸油能力在 11 月最大（3.20 mL/g）。由图 3B 可知，3 种木薯粉在 8 月、9 月、12 月的吸油能力均无显著性差异（P>0.05）；在 10 月，SC205、SC9 木薯粉的吸油能力显著高于 GR891 木薯粉（P<0.05）；在 11 月，SC9 木薯粉的吸油能力显著高于 SC205、GR891 木薯粉（P<0.05）。这可能与不同木薯品种在不同生长期内的营养成分含量差异有关，亲水性成分（碳水化合物和蛋白质）含量越高，吸油能力越低[27]。

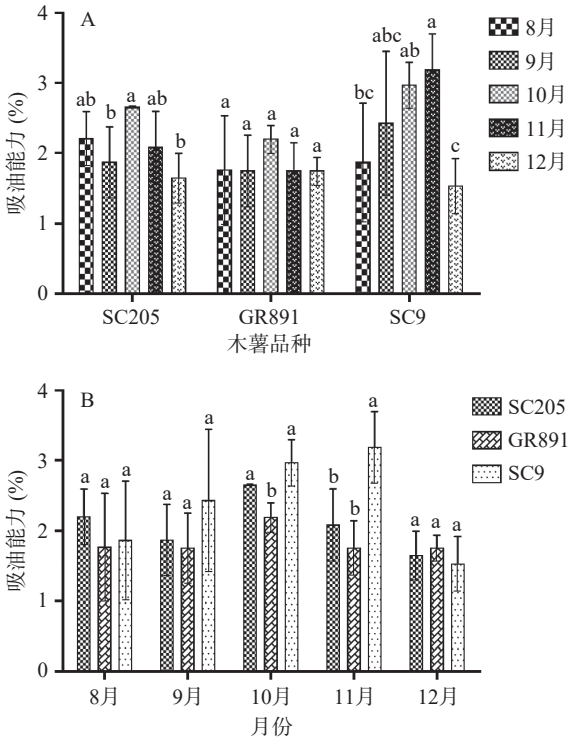


图 3　生长期对木薯粉吸油性的影响

Fig.3　Effect of growing periods on oil absorption capacity of cassava flours

2.2.4　溶解性　由图 4 可知，随着生长期的延长，3 种木薯粉在 4 个温度梯度下的溶解度整体呈现先升高后降低再升高的趋势，可能与不同生长期木薯淀粉的多尺度结构（精细结构、晶体结构和颗粒结构等）有关，木薯淀粉中短程有序结构比例、结晶度及颗粒尺寸的增加，能够提升其溶解度，从而间接提高木薯粉的溶解度[29]。3 种木薯粉的各生长期在 65、75 ℃ 条件下的溶解度均无显著性差异（P>0.05）；在 85、95 ℃ 条件下，SC205、GR891 木薯粉的溶解度均在 9 月份达到最大值，SC9 木薯粉的溶解度均在 12 月份达到最大值。不同生长期 3 种木薯粉的溶解性在低温（65、75 ℃）、高温（85、95 ℃）条件下呈现的差异性，可能是温度的变化导致不同生长期木薯粉的组成物质性质发生改变[30]。

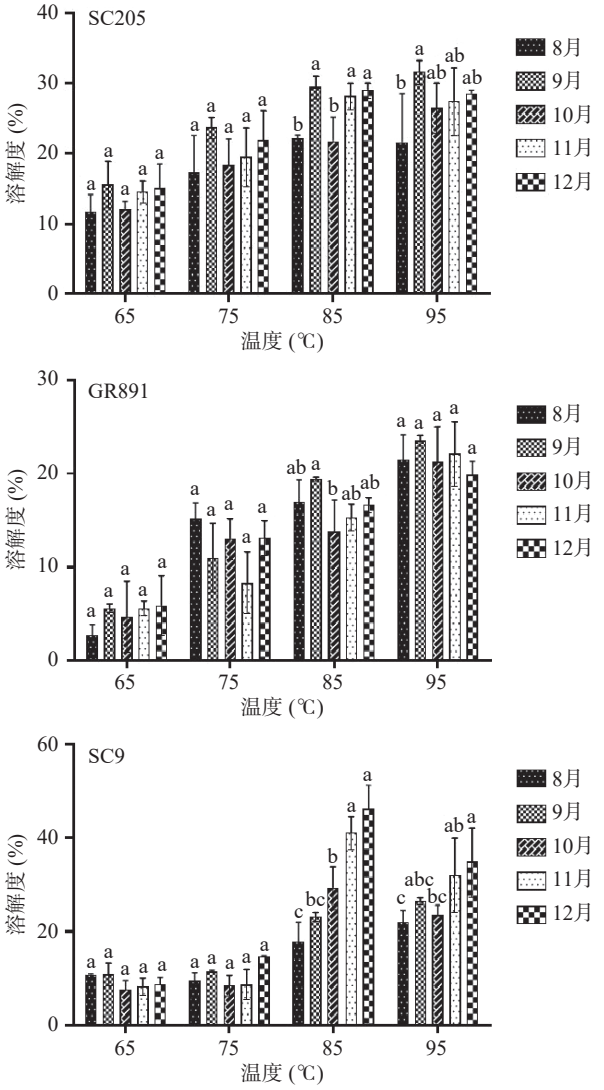


图 4　生长期对木薯粉溶解性的影响

Fig.4　Effect of growing periods on solubility of cassava flours

在一定温度下，木薯粉的溶解度体现了粉颗粒与水分子之间相互作用的大小[31]。由图 5 可知，SC205、GR891 木薯粉在不同月份中的溶解度均是在 65 ℃ 条件下最低，显著低于 85、95 ℃ 条件下的溶解度（P<0.05），SC9 木薯粉在不同月份中的溶解度均是在 85、95 ℃ 条件下表现出较高的溶解度，均显著高于 65、75 ℃ 条件下的溶解度（P<0.05）。3 种木薯粉在不同月份的溶解度均随着水浴温度的升高整体呈现上升趋势，这是因为温度升高削弱了木薯粉中淀粉分子的颗粒间结合力[32]，而在加热过程中会使淀粉分子的半结晶结构发生破坏，水分子通过与直链淀粉和支链淀粉分子的相互作用，导致淀粉颗粒膨胀，提高了淀粉的溶解度[33]，这与 Zhang 等[32] 对木薯

淀粉的报道一致。但 11 月、12 月的 SC205 木薯粉，10 月~12 月的 SC9 木薯粉的溶解度在极高温度(95 ℃)时有所回落，可能是因为温度的升高，木薯粉中的短链分子重排，与水分子间作用减弱，导致溶解度降低，这与闫巧珍等[34] 对马铃薯全粉溶解度的报道一致。

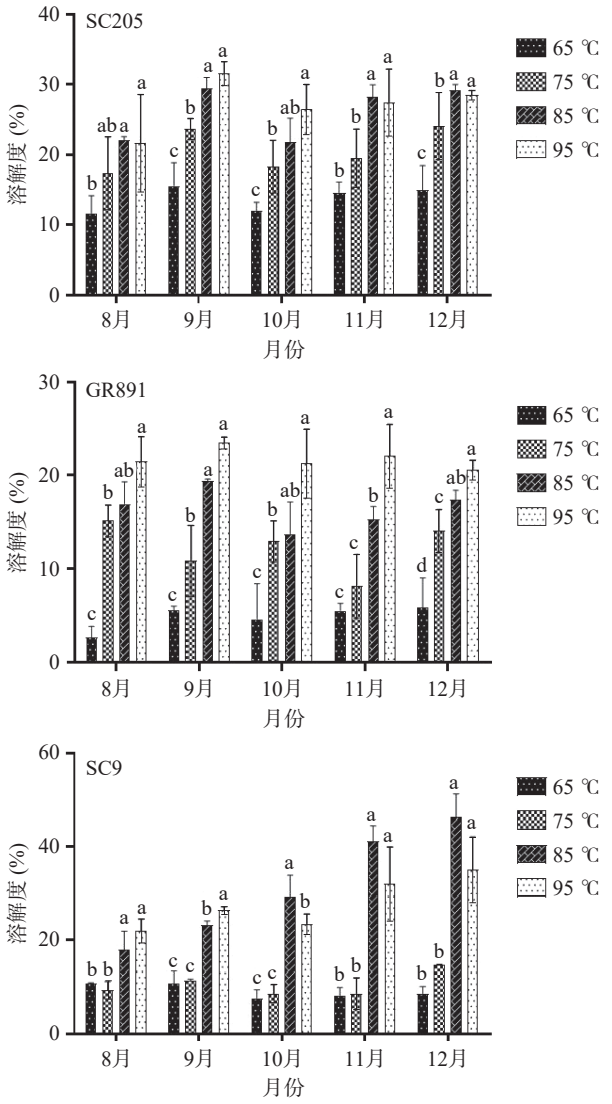


图 5 温度对木薯粉溶解性的影响

Fig.5 Effect of temperature on solubility of cassava flours

在相同月份和水浴温度条件下，3 种木薯粉的溶解度差异较大。比较图 4、图 5 可知，在 65、75 ℃ 条件下，不同月份的 SC205 木薯粉的溶解度均高于同等条件下的 GR891、SC9 木薯粉；SC9 木薯粉在 85 ℃ 条件下的 10 月~12 月的溶解度增加较大，高于同等条件下的 SC205、GR891 木薯粉；GR891 木薯粉的溶解度在 8 月~12 月、65~95 ℃ 条件下均低位稳定；95 ℃ 高温条件削弱了 3 种木薯粉的溶解度差异。

2.2.5 膨胀度 随着生长期的延长，3 种木薯粉呈现不同的变化趋势，见图 6。在不同温度条件下，SC205 木薯粉的膨胀度均呈现上升趋势，GR891 木薯粉的膨胀度变化趋势稳定，SC9 木薯粉在 65、75 ℃ 条件下的膨胀度随着生长期延长呈上升趋势，在 85 ℃ 条件下的膨胀度随着生长期延长呈下降趋势，在 95 ℃ 条件下的膨胀度变化趋势稳定。3 种木薯粉在不同生长期的膨胀度呈现的不同变化趋势，可能与不同生长期的物质组成动态变化有关。木薯粉中的主要成分是淀粉，膨胀度与支链淀粉有关，与短支链含量呈正相关，长支链含量呈负相关[35]，而淀粉中的直链淀粉和支链淀粉的相互作用会影响膨胀度，支链淀粉含量高，容易吸水膨胀，增加膨胀度[4]。

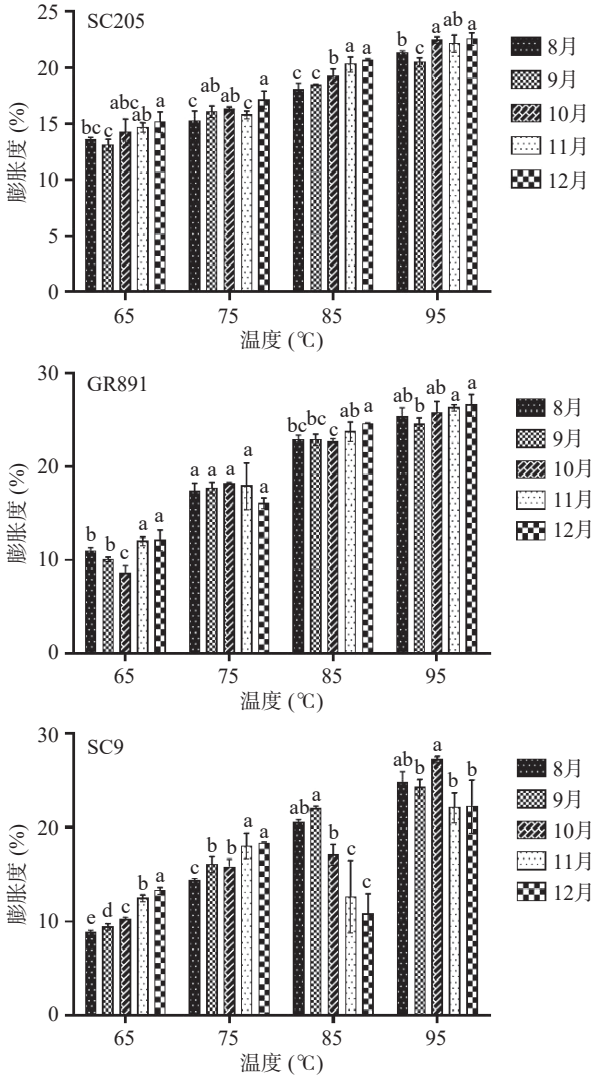


图 6 生长期对木薯粉膨胀度的影响

Fig.6 Effect of growing periods on swelling capacity of cassava flours

由图 7 可知，3 种木薯粉在不同月份的膨胀度整体上随着水浴温度的升高呈现上升趋势，这与 Dudu 等[5] 报道的一致，这是由于温度升高，木薯粉中的微晶束结构开始疏松，水分子与暴露出来的极性基团相结合，从而吸收水分使膨胀度增加[31]。

在相同的月份和水浴温度条件下，3 种木薯粉的膨胀度差异较大。比较图 6、图 7 可知，在 65 ℃ 条件下，SC205 木薯粉在不同月份的膨胀度均最大，高

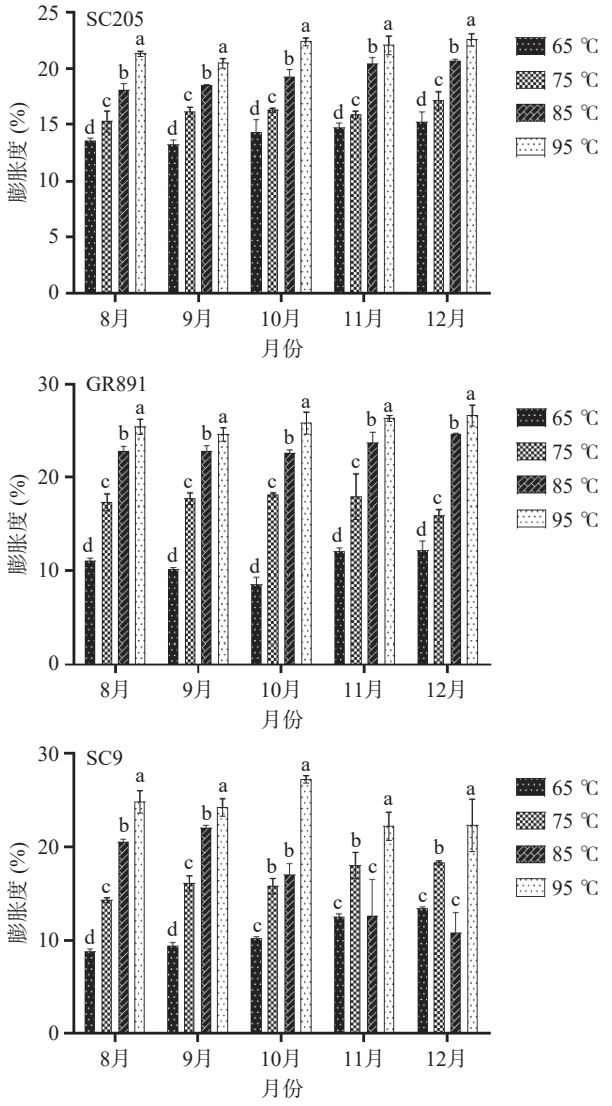


图 7　温度对木薯粉膨胀度的影响

Fig.7　Effect of temperature on swelling capacity of cassava flours

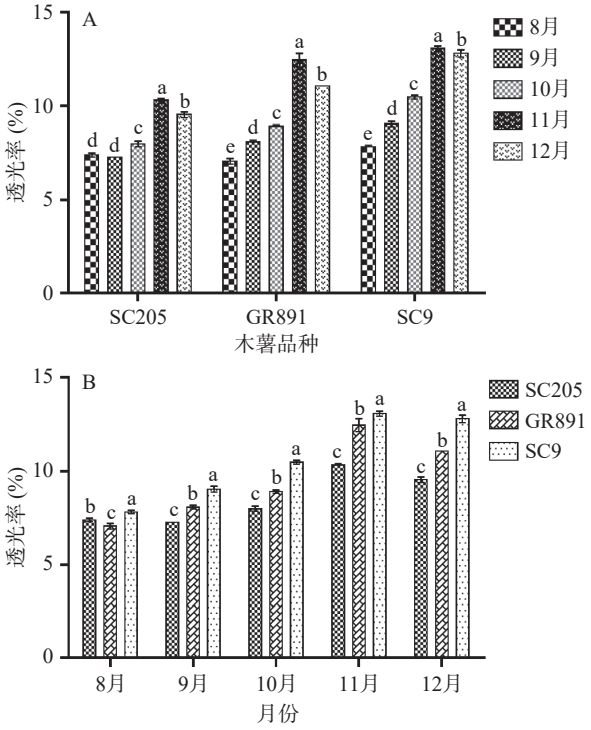


图 8　生长期对木薯粉透光率的影响

Fig.8　Effect of growing periods on light transmittance of cassava flours

于 GR891、SC9 木薯粉；除 75 ℃ 条件下的 11 月、12 月，95 ℃ 条件下的 10 月外，在 75、85、95 ℃ 条件下，GR891 木薯粉在不同月份的膨胀度整体高于 SC205、SC9 木薯粉。

2.2.6　透光率　透光率主要影响食品的外观、用途和可接受度[36−37]，透光率越高则样品的透明度越好。随着生长期的延长，3 种木薯粉的透光率均呈现先上升后下降的趋势，如图 8A 所示，在 11 月份时透光率最高，且均显著高于其他月份的透光率（P<0.05），可能是因为其他月份木薯粉中蛋白质、粗纤维影响了光的反射和折射，进而影响了透光率[36]。由图 8B 可知，在 3 种木薯粉的透光率中，SC9 木薯粉在各月份的透光率均显著高于其余两个品种（P<0.05）；除 8 月份外，GR891 木薯粉在其他月份的透光率均显著高于 SC205 木薯粉（P<0.05）。不同生长期的 3 种木薯粉的透光率在 7.10%~12.83% 范围，低于木薯淀粉的 19.53%[37]，高于糯与非糯小麦面粉的透光率（2.70%~4.65%）[38]。

2.2.7　冻融稳定性　冻融稳定性可以反映样品在冷加工或储存过程中的稳定性，析水率越低，冻融稳定性越好[28]。由图 9A 可知，随着生长期的延长，SC205 木薯粉的析水率在 10 月份最低，其他月份的析水率无显著性差异（P>0.05），即冻融稳定性均好于其他月

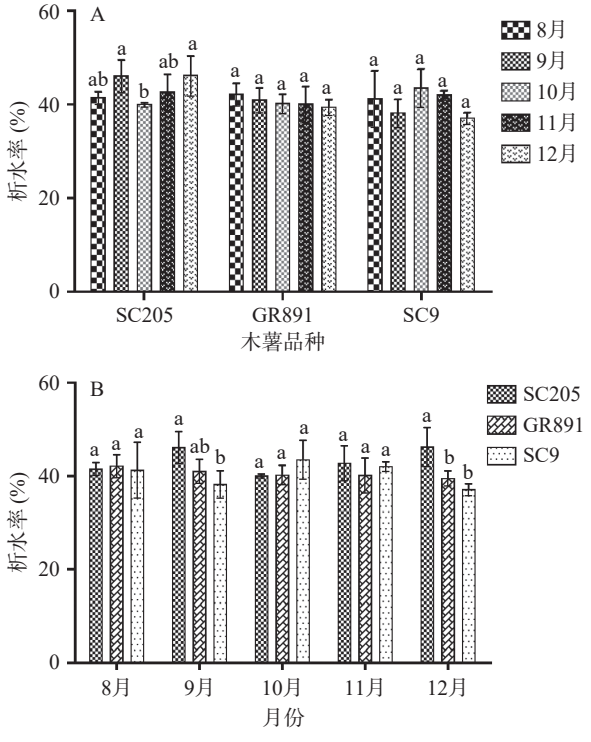


图 9　生长期对木薯粉冻融稳定性的影响

Fig.9　Effect of growing periods on freeze-thaw stability of cassava flours

份；GR891、SC9 木薯粉的析水率均无显著性差异（P>0.05），表明木薯粉受块根成分动态变化的影响较小。由图 9B 可知，3 种木薯粉的析水率在 8 月、10 月、11 月均无显著性差异（P>0.05），SC205 木薯粉的析水率在 9 月、12 月均显著高于 SC9 木薯粉（P<0.05），在 12 月显著高于 GR891 木薯粉（P<0.05）。说明 SC9 木薯粉在 9 月、12 月的冻融稳定性强于 SC205 木薯粉，GR891 木薯粉在 12 月的冻融稳定性强于 SC205 木薯粉，这可能是因为直链淀粉含量越高，析水率越大，冻融稳定性越差[39]。

2.3 相关性分析

分别对 3 种木薯粉在不同生长期的营养成分和加工特性数据进行标准化处理后作皮尔逊相关性分析，其中溶解性和膨胀度的数据均选用 95 ℃ 条件下。相关性分析结果表明（图 10），3 种木薯粉的营养成分含量与加工特性之间存在不同程度的相关性。其中 SC205 木薯粉的析水率与体积密度、吸油性，粗纤维与蛋白质呈显著相关（P<0.05）；GR891 木薯粉的体积密度与蛋白质，粗纤维与析水率、透光率呈显著相关（P<0.05）；SC9 木薯粉的溶解度与体积密度、吸水能力、透光率，吸水能力与膨胀度，析水率与淀粉呈显著相关（P<0.05）。苏键等[7] 对中泰木薯全粉研究显示普遍较高的吸水能力与纤维素含量较高有关，与 SC205、GR891木薯粉的吸水能力与粗纤维含量呈正相关一致。3 种木薯粉的溶解性与膨胀度呈负相关，高膨胀度具有相应的低溶解性，与 Aidoo 等[27] 研究结果一致，其中 GR891 与 SC9 木薯粉的溶解性与膨胀度负相关性极强，SC9 木薯粉在 85 ℃ 条件下表现最为明显。各木薯粉呈不同程度的正负相关，为开发不同的木薯食品提供了科学依据。

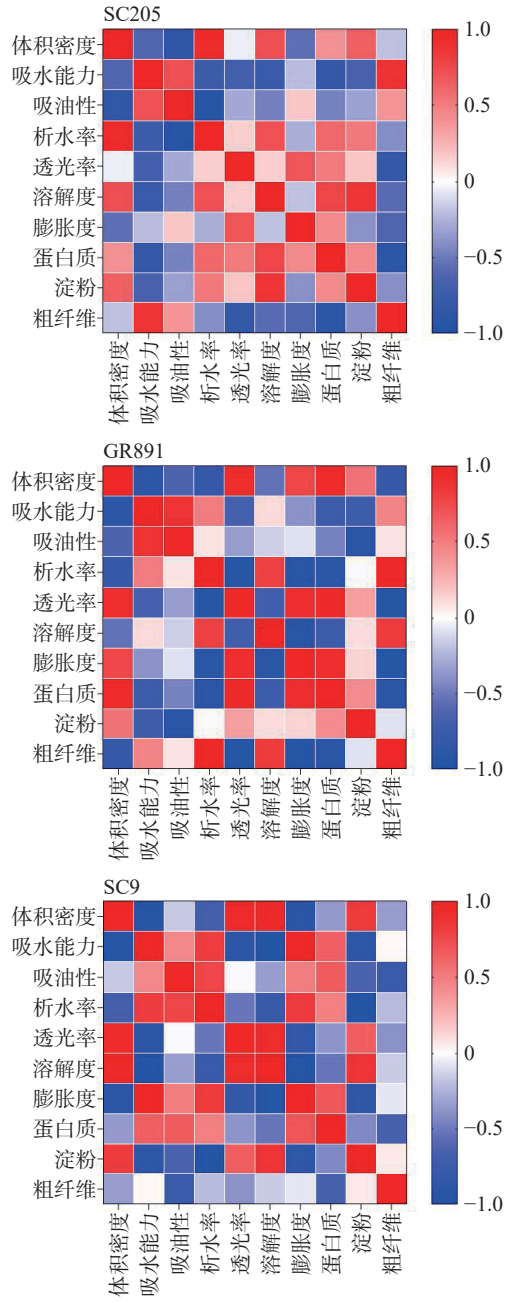


图 10 木薯粉品质的相关性热图

Fig.10 Correlation heat map of cassava flour quality

2.4 聚类分析

将 3 种木薯粉在不同生长期的加工特性和营养成分进行聚类分析，其中溶解性和膨胀度的数据均选用 95 ℃ 条件下。在对各指标进行聚类分析前，对数据进行了标准化处理（图 11）。聚类结果显示，对不同生长期的 3 种木薯粉聚类分析，当欧氏距离阈值为 4.212 时可分成 4 类，从左向右依次分析，第 1 类群为 SC205 的 8 月、10 月，SC9 的 8 月、9 月、10 月，GR891 的 11 月、12 月，该类包括多个子群，各指标结果分布较为分散；第 2 类群为 GR891 的 8 月、9 月、10 月，该类吸油性高、透光率低、溶解性低、膨胀度高、粗蛋白含量低、粗纤维含量高；第 3 类群为 SC205 的 9 月、11 月、12 月，该类吸水性低、析水率高、膨胀度低、粗蛋白含量高、淀粉含量高；第 4 类群为 SC9 的 11 月、12 月，该类体积密度高、析水率低、透光率高、溶解性高、粗纤维含量低。对加工特性和营养成分进行聚类，当欧氏距离阈值为 5.237 时可分成 3 类，从上到下依次分析，第 1 类群为析水率、粗纤维含量，第 2 类群为吸油性、吸水能力、膨

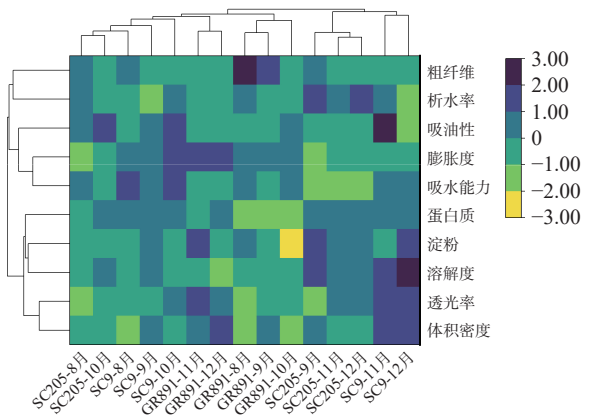


图 11 不同生长期木薯粉及品质间聚类分析

Fig.11 Cluster analysis of cassava flour and quality at different growing periods

表 2　木薯粉加工食品的适配性分析

Table 2　Suitability analysis of cassava flour processed food

品种	生长期	推荐食品	关键指标情况及适配方向
SC205	8月	木薯粥、蒸制糕点	体积密度较低(0.73 g/mL)，吸水能力高(117.77%)，适合蒸煮类食品；吸油性中等(2.21 mL/g)，淀粉含量适中(67.03%)，提供黏性。
	9月	木薯糕、速溶汤粉	淀粉含量高(75.3%)，溶解度高(31.69%)，适合制作细腻糕点或预糊化速溶粉；吸油性低(1.87 mL/g)，减少油腻感。
	10月	油炸木薯片	吸油性较高(2.66 mL/g)，析水率低(40.19%)，淀粉含量适中(69.70%)，适合高温油炸形成酥脆质地。
	11月	凝胶软糖	透光率高(10.37%)，蛋白质含量(4.80%)和淀粉含量(73.60%)协同，适合透明凝胶类食品。
	12月	木薯烘焙饼干	淀粉含量高(69.90%)，吸水能力低(102.44%)，适合低水分烘焙，溶解度低(28.58%)，适合脆性食品加工。
GR891	8月	膨化木薯条	膨胀度高(25.47%)，吸油性高(1.78 mL/g)，高粗纤维(2.57%)，吸水能力高(119.64%)，适合膨化工艺。
	9月	木薯脆片	膨胀度高(24.63%)，高粗纤维(2.23%)。
	10月	木薯面条(需混合)	吸水能力较高(122.58%)，但木薯粉低蛋白(2.75%)需混合高筋面粉(如小麦粉)以增强韧性。
	11月	压缩能量棒	体积密度高(0.76 g/mL)，溶解度低(22.12%)，适合高压成型，淀粉含量高(77.63%)，增加黏合性。
	12月	木薯发糕	析水率最低(39.60%)，膨胀度高(26.66%)，适合蒸制发酵糕点，需添加酵母或泡打粉。
SC9	8月	木薯珍珠(奶茶)	吸水能力较高(124.14%)，体积密度低(0.71 g/mL)，淀粉含量适中(66.83%)，提供Q弹口感。
	9月	油炸木薯球	吸油性较高(2.44 mL/g)，溶解度适中(26.53%)，适合包裹馅料油炸，形成外层酥脆。
	10月	膨化木薯脆圈	吸油性较高(2.98 mL/g)，膨胀度高(27.27%)，适合膨化后涂层调味(如芝士脆圈)。
	11月	透明凉粉、果冻、水晶饺皮	透光率最高(13.10%)，溶解度高(32.02%)。
	12月	速溶木薯糊	溶解度最高(35.01%)，淀粉含量(75.87%)较高，适合即冲即食糊类食品，需添加风味剂提升口感。

胀力，第 3 类群为体积密度、透光率、粗蛋白含量、溶解性、淀粉含量，其在各生长期的变化趋势总体一致。

2.5　加工食品适配性探讨

木薯粉在不同生长期的品质直接影响其在各种食品加工中的适用性。从表 2 可以看出，不同品种、不同月份的木薯粉在食品加工中的应用场景覆盖主食、零食、速溶等食品，品种特性与加工适应性呈现时空差异性。但在实际应用中，建议结合地域饮食习惯进行配方和工艺调整。

3　结论

本研究通过分析不同生长期 3 种食用木薯粉的营养成分和加工特性，揭示了生长期对 3 种食用木薯粉品质的影响。结果表明，SC205、GR891、SC9 木薯粉的营养成分含量和加工特性随生长期的延长呈现差异性，其中 SC9 木薯粉在 11 月的淀粉含量最高(77.63%)，粗纤维含量最低(0.70%)，GR891 木薯粉在 9 月的蛋白质含量最高(5.26%)。3 种木薯粉的体积密度、吸水能力、吸油能力、溶解度、膨胀度、透光率及冻融稳定性等加工特性指标均随生长期的延长呈现品种特异性月际变化规律，且营养成分与加工特性之间存在不同程度的正负相关。通过聚类分析，可将不同生长期的 3 种木薯粉划分为 4 个类群，加工特性和营养成分可划分为 3 个类群。对不同生长期的木薯粉进行食品加工适配性探讨，品种特性与加工适应性呈现时空差异性，其应用场景可覆盖主食、零食、速溶等食品。研究结果为确定木薯最佳采收期及开发多样化木薯产品提供了理论依据，对提升木薯产业链附加值具有重要实践意义。然而，研究尚未能解析加工特性与营养成分间的动态互作内在机制(如 SC9 木薯粉在 11 月、12 月则呈现先上升(65~75 ℃)后下降(75~85 ℃)再上升(85~95 ℃)趋势的原因)、木薯粉加工成食品的适配性还仅停留在理论上等，未来研究需结合组学技术揭示品质形成机制，进行多品种比较研究以验证结论普适性，从而推动木薯粉的产业化应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] CHIMPHEPO L, ALAMU E O, MONJEREZI M, et al. Physicochemical parameters and functional properties of flours from advanced genotypes and improved cassava varieties for industrial applications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 1−9.

[2] DU P X, WANG Q F, HE Y, et al. Lipidomic profiling and storage-induced changes in cassava flour using LC-MS/MS[J]. Foods, 2024, 13(19): 1−14.

[3] LI S B, CUI Y Y, ZHOU Y, et al. The industrial applications of cassava: current status, opportunities and prospects[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(8): 2282−2290.

[4] KATUNZI-KILEWELA A, RWEYEMAMU L MP, KAALE L D, et al. Proximate composition, pasting and functional properties of composite flour blends from cassava and chia seeds flour[J]. Food Science and Technology International, 2023, 29(3): 1−11.

[5] DUDU O E, LI L, OYEDEJI A B, et al. Structural and functional characteristics of optimised dry-heat-moisture treated cassava flour and starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 1219−1227.

[6] SANGPUEAK R, SAENGCHAN C, LAEMCHIAB K, et al. Flour on gluten-free muffins from different edible cassava varieties in Thailand[J]. Foods, 2022, 11(24): 1−11.

[7] 苏键, 覃晓, YONKOKSUNG U, 等. 中泰木薯全粉的理化和质构特性比较及其食品开发[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 77−83. [SU Jian, QIN Xiao, YONKOKSUNG U, et al. Physicochemical, textural properties and food products de-

velopment of cassava flour from China and Thailand[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 77−83.]
[8] QI M M, JIANG L J, SONG J L, et al. Extrusion modification of cassava flour for improved mashing efficiency[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 177: 1−9.
[9] ARMAH J O, APPIAH V, EGBLEWOGBE M N Y H, et al. Characterization of flour produced from gamma irradiated dried cassava (*Manihot esculenta*) chips[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 218: 1−9.
[10] CONDE L A, KEBEDE B, OEY I. Evaluate the volatile retention performance of structurally modified cassava flour through pulsed electric fields[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 92: 1−10.
[11] DUDU O E, OYEDEJI A B, OYEYINKA S A, et al. Impact of steam-heat-moisture treatment on structural and functional properties of cassava flour and starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 1056−1064.
[12] GOURILEKSHMI S S, JYOTHI A N, SREEKUMAR J. Physicochemical and structural properties of starch from cassava roots differing in growing duration and ploidy level[J]. Starch, 2020, 72: 1−34.
[13] 郑永清, 李开绵, 李伯松, 等. 木薯品种不同收获期块根淀粉积累规律分析[J]. 热带生物学报, 2025, 16(2): 172−180. [ZHENG Yongqing, LI Kaimian, LI Bosong, et al. Analysis of starch accumulation in root tuber of cassava cultivars during different harvesting periods[J]. Journal of Tropical Biology, 2025, 16(2): 172−180.]
[14] 林立铭, 李开绵, 徐缓, 等. 木薯全粉和木薯粉加工特性分析[J]. 热带生物学报, 2016, 7(1): 58−63. [LIN Liming, LI Kaimian, XU Yuan, et al. Comparative analysis of processing characteristics of whole cassava flour and cassava flour[J]. Journal of Tropical Biology, 2016, 7(1): 58−63.]
[15] 仇干, 胥心, 邓云. 紫马铃薯全粉-小麦粉混粉的理化特性研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(3): 15−17. [QIU Gan, XU Xin, DENG Yun. Study on physicochemical properties of purple potato powder and wheat flour blends[J]. Food Research And Development, 2017, 38(3): 15−17.]
[16] 吴立根, 王岸娜, 屈凌波, 等. 猕猴桃糖蛋白及其去糖链蛋白功能特性的研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 1−7. [WU Ligen, WANG Anna, QU Lingbo, et al. Study on the functional properties of kiwifruit glycoprotein and its deglycosylated protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(9): 1−7.]
[17] 刘婷婷, 崔海月, 樊红秀, 等. 超声波辅助提取人参淀粉工艺优化及其性质[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 34−40. [LIU Tingting, CUI Haiyue, FAN Hongxiu, et al. Ultrasonic-sssisted extraction and characterization of ginseng starch[J]. Food Science, 2014, 35(10): 34−40.]
[18] 任瑞林, 刘培玲, 包亚莉, 等. 高静压物理变性法对木薯淀粉理化性质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(3): 150−156. [REN Ruilin, LIU Peiling, BAO Yali, et al. The infulence of high hydrostatic pressure on physicochemical properties of tapioca starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(3): 150−156.]
[19] 郭爱良, 周湘寒, 姚亚亚, 等. 不同玉米品种理化特性及淀粉品质的研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(5): 39−47. [GUO Ailiang, ZHOU Xianghan, YAO Yaya, et al. Physicochemical properties and starch quality of different maize varieties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5): 39−47.]
[20] 林莹, 古碧, 李凯, 等. 生长期对不同品种(系)木薯品质特性的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2011, 30(1): 51−56. [LIN Ying, GU Bi, LI Kai, et al. The effect of growing period on the quality properties of various cassava cultivars[J]. Genomics and Applied Biology, 2011, 30(1): 51−56.]
[21] 张晓艳, 王丽丽, 刘淑云, 等. 不同基因型甘薯品种产量及营养成分的动态变化[J]. 山东农业科学, 2011(1): 24−28,32. [ZHANG Xiaoyan, WANG Lili, LIU Shuyun, et al. Dynamic changes of yield and nutritional Components of different genotypical sweet potato varieties[J]. Shandong Agricutural Sciences, 2011(1): 24−28,32.]
[22] SAITHONG T, RONGSIRIKUL O, KALAPANULAK S, et al. Starch biosynthesis in cassava: a genome-based pathway reconstruction and its exploitation in data integration[J]. BMC Systems Biology, 2013, 7: 75.
[23] 周宾, 李艳英, 苏冬辉, 等. 6 个食用木薯品种(系)块根的品质评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(3): 33−39. [ZHOU Bin, LI Yanying, SU Domghiu, et al. Quality evaluation of root tubers of six edible cassava varieties (lines)[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2024, 39(3): 33−39.]
[24] 周锴, 安飞飞, 李开绵, 等. 木薯块根不同发育期 β-胡萝卜素和蛋白质积累变化及其有色体蛋白质组学研究[J]. 热带作物学报, 2022, 43(5): 871−881. [ZHOU Kai, AN Feifei, LI Kaimian, et al. Changes of β-carotene and protein accumulation and proteomic analysis of chromoplasts in different developmental stages of cassava tuberous roots[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(5): 871−881.]
[25] 丁俊豪. 油莎豆粉对面团及馒品质特性的影响研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2019. [DING Junhao. Effect of *Cyperus esculentus* powder on the quality characteristics of dough and alfalfa[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2019.]
[26] 罗里·J. 希拉克, 约翰·迈克尔·瑟雷西, 安东尼·查尔斯·贝洛蒂. 木薯生物学、生产与应用[M]. 欧文军, 李开绵, 译. 北京: 中国农业出版社, 2022. [HILLOCKS R J, THRESH J M, BELLOTTI A C. Cassava biology, production and utilization[M]. OU W J, LI K M, Primary Translator, Beijing: China Agriculture Press, 2022.]
[27] AIDOO R, ODURO I N, AGBENORHEVI J K, et al. Physicochemical and pasting properties of flour and starch from two new cassava accessions[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 561−569.
[28] LU H Q, GUO L Y, ZHANG L C, et al. Study on quality characteristics of cassava flour and cassava flour short biscuits[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 521−533.
[29] XU M H, XU C Y, KIM S J, et al. Investigating the evolution of the fine structure in cassava starch during growth and its correlation with gelatinization performance[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265: 1−10.
[30] 殷贺中, 梁丽松, 王贵禧. 榛子粉溶解性和膨胀势与其主要物质组成的关系[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2321−2329. [YIN Hezhong, LIANG Lisong, WANG Guixi. Relationship between solubility, swelling power and main substance composition of hazelnut powder[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2321−2329.]
[31] 董吉林, 李鹏冲, 禹晓, 等. 不同全麦面粉的品质特性研究[J]. 食品工业, 2018, 39(4): 242−247. [DONG Jilin, LI Pengchong, YU Xiao, et al. Research on the physicochemical properties of phole pheat flour[J]. The Food Industry, 2018, 39(4): 242−

247.］
［32］ ZHANG Q, ZHANG S A, DENG L L, et al. Effect of vacuum treatment on the characteristics of oxidized starches prepared using a green method［J］. Starch, 2018, 70(3−4): 1−36.
［33］ MACHADO C M, BENELLI P, TESSARO I C. Effect of acetylated starch on the development of peanut skin-cassava starch foams［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 1706−1716.
［34］ 闫巧珍, 高瑞雄, 张正茂, 等. 湿热处理对马铃薯全粉品质的影响［J］. 现代食品科技, 2017, 33(4): 264−270,294. ［YAN Qiaozhen, GAO Ruixiong, ZHANG Zhengmao, et al. Effect of heat-moisture treatment on the quality of potato flakes［J］. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(4): 264−270,294.］
［35］ LI G T, ZHU F. Amylopectin molecular structure in relation to physicochemical properties of quinoa starch［J］. Carbohydrate Polymers, 2017, 164: 396−402.
［36］ 田鑫. 不同品种马铃薯全粉微观结构与品质特性研究［D］. 杭州：浙江大学, 2017. ［TIAN Xin. Research on microstructure and quality characteristics of different varieties potato flakes［D］. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.］
［37］ 李明娟, 王颖, 张雅媛, 等. 5 种干燥方式对木薯酸淀粉性能的影响［J］. 食品工业科技, 2024, 45(8): 134−142. ［LI Mingjuan, WANG Ying, ZHANG Yayuan, et al. Effects of five drying methods on the properties of sour cassava starch［J］. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 134−142.］
［38］ 李春燕, 张雯霞, 张玉雪, 等. 小麦籽粒淀粉与面粉的理化特性差异［J］. 作物学报, 2018, 44(7): 1077−1085. ［LI Chunyan, ZHANG Wenxia, ZHANG Yuxue, et al. Differences in physicochemical properties between flour and starch of wheat grain［J］. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(7): 1077−1085.］
［39］ HSIEH C F, LIU W C, WHALEY J K, et al. Structure and functional properties of waxy starches［J］. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 238−254.