

基于主成分分析和聚类分析对不同品种甘薯淀粉与粉条品质的综合评价

罗 密, 尹 旺, 邓仁菊, 关郁芳, 潘 牧, 吴巧玉, 付 梅

Comprehensive Evaluation of Starch and Noodles Quality of Different Sweet Potato Varieties Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

LUO Mi, YIN Wang, DENG Renju, GUAN Yufang, PAN Mu, WU Qiaoyu, and FU Mei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110125>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于主成分分析和聚类分析的李子果实品质综合评价

Comprehensive Evaluation of Plums Quality Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2024, 45(8): 293-300 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060002>

基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价

Quality Evaluation of Different Varieties of Oat Based on Principal Components Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2020, 41(13): 85-91 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.014>

基于主成分分析和聚类分析的蓝莓品质综合评价

Comprehensive Evaluation of Blueberry Quality Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2022, 43(13): 311-319 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021110198>

基于主成分分析和聚类分析综合评价蒸谷米的品质特性

Comprehensive Evaluation of Quality Characteristics of Parboiled Rice Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2021, 42(7): 258-267 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050209>

基于主成分分析与聚类分析的软枣猕猴桃果实品质综合评价

Comprehensive Evaluation of Fruit Quality of *Actinidia arguta* Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2024, 45(1): 247-257 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020245>

基于主成分及聚类分析的药用菊花品种产量与品质综合评价

Comprehensive Evaluation on Yield and Quality of Medicinal *Chrysanthemum morifolium* Varieties Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

食品工业科技. 2024, 45(5): 271-280 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050062>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

罗密,尹旺,邓仁菊,等. 基于主成分分析和聚类分析对不同品种甘薯淀粉与粉条品质的综合评价[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 246–257. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110125

LUO Mi, YIN Wang, DENG Renju, et al. Comprehensive Evaluation of Starch and Noodles Quality of Different Sweet Potato Varieties Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 246–257. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110125

· 分析检测 ·

基于主成分分析和聚类分析对不同品种甘薯淀粉与粉条品质的综合评价

罗密^{1,2,3}, 尹旺^{1,2,3}, 邓仁菊^{1,2,3,*}, 关郁芳^{1,2,3}, 潘牧^{1,2,3}, 吴巧玉^{1,2,3}, 付梅⁴

(1.贵州省农业科学院生物技术研究所, 贵州贵阳 550009;

2.贵州省农业生物技术重点实验室, 贵州贵阳 550009;

3.农业农村部喀斯特山区作物基因资源与种质创新重点实验室, 贵州贵阳 550009;

4.贵州省农作物技术推广总站, 贵州贵阳 550000)

摘要:为科学评价不同品种甘薯淀粉品质, 并建立甘薯淀粉品质评价体系, 以 10 个淀粉型甘薯品种为试验材料, 对其淀粉组成、粒径、分子聚合度、热力学特性、糊化特性和粉条品质指标进行测定分析, 研究不同甘薯品种淀粉性质的差异, 并且运用相关性分析、主成分分析和聚类分析对淀粉品质进行综合评价。结果表明, 不同品种之间淀粉各项品质指标存在显著性差异 ($P<0.05$), 由相关性分析发现各淀粉性质指标之间有不同程度的相关性, 并且粉条品质主要与淀粉组成、粒径以及分子聚合度密切相关。通过主成分分析从 28 个指标中提取了 7 个主成分, 累计方差贡献率为 96.761%, 能够反映原指标的大部分信息。10 个甘薯品种淀粉品质指标综合得分从高到低依次为: 渝薯 198、商薯 19、渝薯 50、渝薯 15、齐宁 19、黔薯 11、徐薯 22、苏薯 28、徐薯 37、鄂薯 6 号。聚类分析将 10 个甘薯品种分为五类, 其中第 III 类的商薯 19, 淀粉粒径较大, 回生值较高, 粉条断条率较低, 弹性较好, 该品种适宜用作粉条加工。渝薯 198 综合得分最高, 粉条咀嚼性较好, 但是蒸煮损失较高、硬度较大; 鄂薯 6 号、苏薯 28 和徐薯 37 综合得分较低, 粉条品质较差, 不适宜用作粉条加工。

关键词:甘薯, 淀粉品质, 粉条, 主成分分析, 聚类分析

中图分类号: S531

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)04-0246-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110125



本文网刊:

Comprehensive Evaluation of Starch and Noodles Quality of Different Sweet Potato Varieties Based on Principal Component Analysis and Cluster Analysis

LUO Mi^{1,2,3}, YIN Wang^{1,2,3}, DENG Renju^{1,2,3,*}, GUAN Yufang^{1,2,3}, PAN Mu^{1,2,3}, WU Qiaoyu^{1,2,3}, FU Mei⁴

(1. Biological Technology Institute of Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550009, China;

2. Guizhou Key Laboratory of Agricultural Biotechnology, Guiyang 550009, China;

3. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Crop Genetic Resources and Germplasm Innovation in Karst Region, Guiyang 550009, China;

4. Guizhou Provincial Crop Technology Extension Station, Guiyang 550000, China)

Abstract: To scientifically evaluate the starch quality of different sweet potato varieties and establish the sweet potato starch quality evaluation system, 10 starchy sweet potato varieties were used as experimental materials. Their starch

收稿日期: 2023-11-14

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合基础-ZK[2022] 一般 280); 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2023] 一般 024); 贵州省育种科研基础平台创新能力建设 (黔科合企企 [2022]014); 贵州喀斯特山区重要作物生物育种平台建设 (黔科合中引地 [2023]033)。

作者简介: 罗密 (1992-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 甘薯栽培与育种技术研究, E-mail: miluo3480@163.com。

*** 通信作者:** 邓仁菊 (1982-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 薯类作物育种与栽培技术研究, E-mail: xiaoju63@163.com。

composition, particle size, molecular polymerization, thermodynamic characteristics, gelatinization properties, and noodles quality indexes were determined and analyzed. The differences in starch properties among different sweet potato varieties were thoroughly investigated. Furthermore, the quality of starch was evaluated using correlation analysis, principal component analysis (PCA), and cluster analysis. Results exhibited significant variations in starch quality indexes among different varieties ($P<0.05$). Correlation analysis revealed varying degrees of association among the starch property indexes, with noodles quality primarily influenced by starch composition, particle size and molecular polymerization. By principal component analysis, 28 quality indicators were simplified into 7 principal components, and the cumulative variance contribution rate was 96.761%, which could reflect most of the information of the original indicators. The comprehensive scores of starch quality indexes of 10 sweet potato varieties were ranked as Yushu 198, Shangshu 19, Yushu 50, Yushu 15, Qining 19, Qianshu 11, Xushu 22, Sushu 28, Xushu 37, Eshu 6. The 10 sweet potato varieties were classified into five categories through cluster analysis. Among them, Shangshu 19 in the third category exhibits larger starch particle size and higher setback value, a low noodles breaking rate and excellent elasticity, which was suitable for noodle processing. Yushu 198 has the highest score, with better noodles mastication, but higher cooking loss and greater hardness. Eshu 6, Sushu 28 and Xushu 37 received low comprehensive scores indicating poor noodles quality and unsuitability for noodles processing.

Key words: sweet potato; starch quality; noodles; principal component analysis; cluster analysis

甘薯(*Ipomoea batatas*(L.)Lam.)属于旋花科甘薯属一年生草本植物^[1]。据 FAO 统计,2022 年我国甘薯收获面积为 215.73 万公顷,总产量为 4682.88 万吨,居于世界首位^[2]。淀粉是甘薯块根的主要成分,约占其干重的 50%~80%^[3]。甘薯淀粉被广泛应用于食品、化工等行业,可作为食品添加剂、增稠剂,同时也是生产甘薯粉条的主要原料。研究表明,粉条品质与淀粉成分、颗粒结构、糊化、老化以及凝胶特性相关^[4-5]。我国甘薯品种资源丰富,其淀粉的化学组成、分子聚合度、晶体结构、淀粉颗粒形态大小、糊化特性以及粉条品质均存在较大差异^[6-8]。由于不同品种间淀粉性质的区别,导致甘薯粉条产品稳定性差,难以满足精深加工的要求。因此建立科学有效的评价方法指导适宜粉条加工甘薯品种的筛选运用具有重要意义。

淀粉性质是由多个指标共同决定,单一的指标并不能综合评价其品质优劣,各指标之间的相关性导致信息发生重叠,给淀粉特性综合评价造成困难。主成分分析和聚类分析可以将多指标进行整合、归纳,简明扼要反映多个指标的信息,目前已经被广泛应用于作物品质特性综合评价研究中^[9-11]。Wang 等^[12]研究了 151 份水稻重组自交系材料,通过主成分分析将 18 个常见水稻品质相关性状简化为 8 个独立主成分,并根据主成分的权重,将材料从优到劣划分为了五种类型。Zeng 等^[13]对 26 个品种玉米粉的化学成分和理化性质进行研究,通过主成分分析发现玉米粉的质量主要与 5 个主成分有关,其中淀粉糊化性能的贡献最大,达到 48.90%,并且通过聚类分析将材料划分为了四类。本研究通过测定 10 份淀粉型甘薯品种的淀粉成分、淀粉颗粒形态和粒径、热力学特性、糊化特性及其粉条品质,研究不同甘薯品种之间的差异性,并采用主成分分析与聚类分析综合评价不同甘薯品种淀粉理化特性和粉条品质,为筛选适用于贵州种植的粉条加工专用甘薯品种提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

10 个供试淀粉型甘薯品种 均由贵州省农业科学院生物技术研究所收集保存,分别为鄂薯 6 号、苏薯 28、黔薯 11、商薯 19、徐薯 22、渝薯 15、徐薯 37、齐宁 19、渝薯 50、渝薯 198,种植于贵州省农业科学院试验田,于移栽 130 d 后采收,挑选无病无伤的薯块研究其淀粉性质;马铃薯直链淀粉标准品、玉米支链淀粉标准品 美国 Sigma 公司;总淀粉含量测定试剂盒 爱尔兰 Megazyme 公司;十二烷基硫酸钠、无水乙醚、石油醚 上海安谱实验科技股份有限公司;无水乙醇、冰醋酸、氢氧化钠、氢氧化钾、硼酸、盐酸、浓硫酸、甲基红、溴甲酚绿 国药集团化学试剂有限公司;3-(N-吗啡啉)丙磺酸钠盐 上海生工生物工程股份有限公司;碘、碘化钾 北京索莱宝科技有限公司;试验所用试剂均为分析纯。

SX-4-10 马弗炉 上海特成机械有限公司;K-370 全自动凯氏定氮仪 瑞士步琦有限公司;LWY-84B 控温式远红外消煮炉 江苏盛蓝仪器制造有限公司;Micro 17R 高速冷冻离心机、CS5000+离子色谱系统 美国 Thermo Fisher Scientific 公司;UV-6000 紫外可见分光光度计 上海元析仪器有限公司;HH-S8 恒温水浴锅 北京科伟永兴仪器有限公司;Sigma 300 扫描电子显微镜 德国蔡司公司;MASTERSIZER 3000 型激光粒度仪 英国 Malvern 公司;Q2000 差式量热扫描仪 美国 TA Instruments;RVA-TM 快速粘度分析仪 瑞典波通仪器公司;TA20 多功能质构仪 上海保圣实业发展有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 淀粉粒提取 将甘薯块根清洗干净、去皮并切成均匀的小块,用家用破壁机将薯块打碎成匀浆。将甘薯匀浆用孔径为 0.15 mm 的网袋过滤,将滤液转至 50 mL 塑料离心管,8000×g 离心 10 min,弃上清液,刮去上层杂质。加质量分数为 0.2% NaOH 溶

液处理 4 h 除去蛋白质和花色苷,重复洗涤几次,直至淀粉干净呈纯白色;用蒸馏水重复洗涤 3 次,无水乙醇脱水 2 次,放置在 40 ℃ 烘箱中干燥 2 d,将干燥的淀粉研磨成粉末,并过孔径为 0.15 mm 的网筛,保存在干燥器中备用^[14]。

1.2.2 淀粉成分分析 甘薯采收后烘干至恒重,并测定干物率,每个样品重复测定 3 次。研磨过孔径为 0.15 mm 的网筛后用于总淀粉含量测定,样品为干基。总淀粉含量测定使用 Megazyme 总淀粉测定试剂盒(K-TSTA)。

$$\text{总淀粉含量(\%)} = \Delta A \times F \times EV / 0.1 \times D \times 1 / 1000 \times 100 / W \times 162 / 180$$

式中: ΔA 为测定样品在 510 nm 处相对于空白对照读取的吸光度值; F 为将吸光度值转换为葡萄糖量的换算因子; EV 为样品提取体积(100 mL); 0.1 为分析的样品体积(0.1 mL); D 为样品溶液稀释系数; 1/1000 为单位 μg 转换为 mg ; 100/ W 为转换至 100 mg 样品, W 为样品质量(mg); 162/180 为从游离葡萄糖转化为脱水葡萄糖的计算因子。

直链淀粉含量测定参照何洁等^[15]的方法进行,每样品重复测定 3 次,采用双波长法绘制直链淀粉标准曲线为 $y=0.0176x-0.0503$ ($R^2=0.9992$); 灰分测定参照 GB 5009.4-2016; 粗蛋白测定参照 GB 5009.5-2016; 粗脂肪测定参照 GB 5009.6-2016; 磷含量测定参照 NY/T2017-2011。

1.2.3 淀粉颗粒形态 将淀粉均匀撒在粘有导电胶的样品台上,用洗耳球吹去多余的淀粉颗粒,然后进行镀金膜处理。在采用电子扫描显微镜(SEM)在 3.0 kV 加速电位下,观察不同甘薯品种淀粉颗粒形状、大小,并拍照保存。

1.2.4 粒径分析 淀粉粒径分布参考 Deng 等^[16]的方法进行,采用激光粒度仪检测。称取淀粉样品 100 mg 放入离心管中,加入蒸馏水涡旋混匀,选择湿法测试模式,将混合均匀的淀粉悬浮液加入到样品池进行测试,遮光系数为 1.5; 遮光度范围为 5%~8%。

1.2.5 分子聚合度分析 淀粉分子聚合度分析按照 Guo 等^[17]的方法进行。称取约 10 mg 已纯化淀粉样品,重悬于 5 mL 水中,沸水浴 60 min,间断涡旋混匀; 加入 50 μL 醋酸钠溶液(0.6 mol/L, pH4.4), 10 μL 2%(w/v)叠氮化钠溶液和 10 μL 异淀粉酶(1400 U), 37 ℃ 恒温水浴 24 h。加入 0.5%(w/v)硼氢化钠溶液,涡旋混匀后放置 20 h。取 600 μL 于离心管中,室温氮吹干燥。溶于 30 μL 氢氧化钠溶液(1 mol/L)60 min,之后加入 570 μL 水稀释, 12000 r/min 离心 5 min,取上清液上样。采用 Thermo ICS-5000 离子色谱系统,利用电化学检测器对淀粉进行分析检测。采用 Dionex™ CarboPac™ PA200 (250×4.0 mm, 10 μm)液相色谱柱,进样量为 5 μL 。流动相 A 相: 0.2 mol/L NaOH; B 相: 0.2 mol/L

NaOH/0.2 mol/L NaAC,柱温为 30 ℃,利用电化学检测器对组分进行分析检测,并计算分子聚合度(DP)和峰面积占比。

1.2.6 热力学特性分析 淀粉热力学特性采用差式量热扫描仪(DSC)参照 Kong 等^[18]的方法进行,并稍作改进。称取淀粉 3.0 mg,置于 DSC 专用小坩埚中央,加入 6 μL ddH₂O,密封后在室温下静置 12 h。然后采用差式量热扫描仪(DSC)测定,每个样品测定 3 次重复。以 10 ℃/min 的速度,从 30 ℃ 升至 105 ℃,并以空坩埚作对照,热力学特性参数用起始糊化温度(T_o)、峰值糊化温度(T_p)、终止糊化温度(T_c)和糊化焓(ΔH)表示。热力学特性测试结束后,将样品于 4 ℃ 放置 10 d,然后测定回生特性,以 10 ℃/min 的速度,由 30 ℃ 升至 105 ℃,记录回生淀粉的熔化焓(ΔH_r)。

1.2.7 糊化特性分析 采用粘度速测仪(RVA)测定淀粉的糊化特性,参考 GB/T 24853-2010 方法进行。准确称取淀粉 3.00 g,以 25.0 mL 水溶解,所有样品均重复测定 3 次。在搅拌过程中管内温度为: 50 ℃ 保持 1 min,以 3.7 min 上升至 95 ℃; 95 ℃ 下保持 2.5 min; 以 3.2 min 降温至 50 ℃, 50 ℃ 下保持 2 min。粘滞性值参数单位用 cP(centPoise)表示。RVA 特征值以峰值粘度(PKV)、最低粘度(HPV)、最终粘度(CPV)、衰减值(BDV=PKV-HPV)、回生值(CSV=CPV-HPV)、峰值时间(Peak time)和糊化温度(PT)描述。

1.2.8 粉条的制备及其品质指标测定

1.2.8.1 粉条的制备 取 15 g 淀粉,于 150 mL 烧杯中,加入 30 g 水搅拌均匀后,倒入 20 cm×20 cm 的方形蒸盘中,放入蒸锅中蒸 5 min,之后于冷水中漂 1 min,取出于 4 ℃ 存放 17 h,切成宽度为 0.5 cm 的粉条,40 ℃ 烘干,装入自封袋保存备用。

1.2.8.2 断条率测定 取粉条样品 20 根在 500 mL 蒸馏水中煮沸 30 min,之后记录断条数,根据公式计算断条率^[19]。断条率(%)=(断条数/20)×100。

1.2.8.3 烹煮品质测定 称取 3 g(干基)粉条于 250 mL 烧杯中,于 100 mL 沸腾的蒸馏水加热 15 min,期间不断搅拌,然后用吸水纸吸去粉条表面的水分后称质量。再将粉条放入烘箱在 105 ℃ 下烘干至恒重,并称质量。分别按公式计算粉条的膨胀系数和蒸煮损失^[19]。膨胀系数=(煮后含水粉条质量(g)-煮后干燥粉条质量(g))/煮后干燥粉条质量(g),蒸煮损失(%)=(煮前粉条质量(g)-煮后干燥粉条质量(g))/煮前粉条质量(g)×100,干物质的量(%)=煮后干燥粉条质量(g)/煮前粉条质量(g)×100。

1.2.8.4 质构特性测定 选择长度相同、粗细均匀的粉条,在沸水中煮 15 min 至粉条完全变软,取 2 根长度一致、大小均匀的粉条并排放于测试台上,选择质构仪 P50 探头进行 TPA 测试。每组样品重复做

3 次平行试验,取平均值作为试验结果。试验参数设定:探头量程: 1000 N;测定模式: 压缩模式;运行速度: 60 mm/min;压缩型变量: 70%;触发感应力: 1.5 N^[20]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 统计与整理试验数据,采用 SPSS 20.0 进行方差分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析。方差分析采用 Duncan's 进行多重比较,相关性分析采用 Pearson 法进行,并使用 Origin 2022 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 淀粉的化学组分分析

由表 1 可知,不同甘薯品种淀粉化学组分差异均达到显著水平($P<0.05$)。干物率变化范围为 26.507%~36.787%,其中徐薯 37 干物率显著高于其余品种($P<0.05$),而渝薯 15 显著低于其余品种($P<0.05$);不同品种总淀粉含量变化范围为 55.168%~67.370%,总淀粉含量较高的有齐宁 19、渝薯 198;直链淀粉含量存在较大差异,变化范围 16.468%~28.494%,其中徐薯 22、渝薯 198 显著高于其余品种($P<0.05$),而鄂薯 6 号、商薯 19 和徐薯 37 则显著低于其余品种($P<0.05$)。本试验中各品种直链淀粉含量与张令文等^[21]报道 8 个甘薯品种直链淀粉含量(17.73%~26.64%)相近,而低于 Zhu 等^[22]研究甘薯表观直链淀粉含量结果(23.3%~26.5%)。不同品种淀粉粗蛋白含量为 0.038%~0.114%,粗脂肪含量为 0.216%~0.600%,灰分含量为 0.169%~0.641%,磷含量为 0.040%~0.054%。说明各品种淀粉组分之间存在差异,这与候夫云等^[23]对不同甘薯品种淀粉组分分析结果略有差异,这可能与甘薯品种资源、生长环境和收获时间差异有关。

2.2 淀粉颗粒形态和粒径分布

不同甘薯品种淀粉颗粒形貌分析结果如图 1 所示,10 个品种淀粉颗粒基本相似,由大淀粉粒和小淀

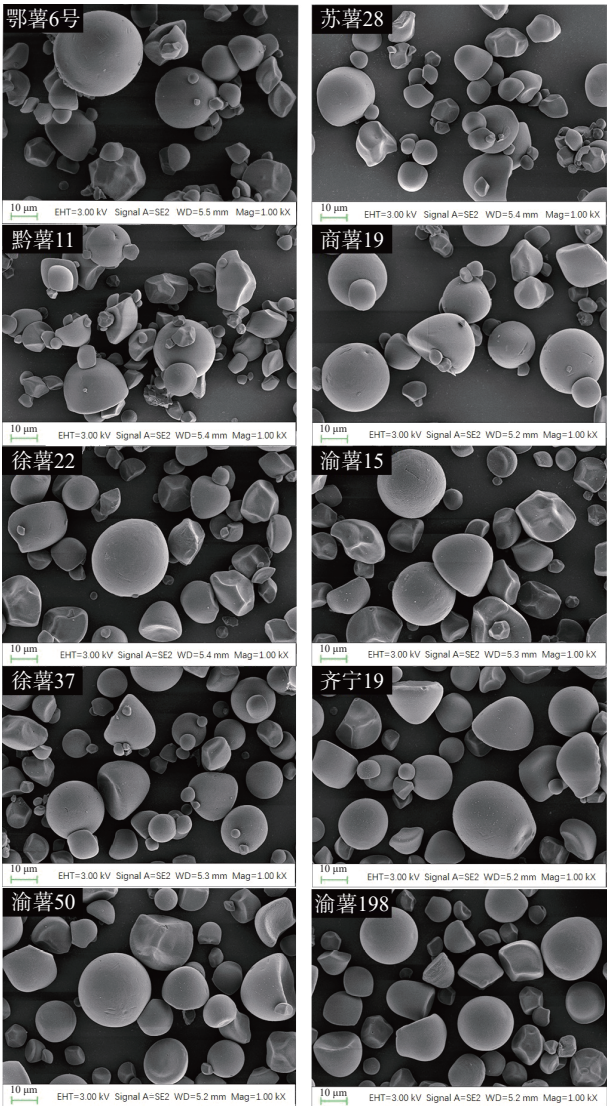


图 1 不同甘薯品种淀粉颗粒扫描电镜图
Fig.1 Scanning electron micrographs of starch of different sweet potato varieties

表 1 不同甘薯品种淀粉化学组分

Table 1 Chemical composition of starch from different sweet potato varieties

品种	干物率(%)	总淀粉(%)	直链淀粉(%)	粗蛋白(%)	粗脂肪(%)	灰分(%)	磷(%)
鄂薯6号	30.537±0.867 ^{cd}	55.168±1.601 ^e	18.172±0.656 ^d	0.114±0.003 ^a	0.228±0.008 ^e	0.589±0.017 ^b	0.047±0.001 ^b
苏薯28	31.847±0.329 ^{bc}	55.796±1.400 ^e	21.487±1.430 ^c	0.102±0.002 ^b	0.550±0.009 ^b	0.636±0.007 ^a	0.047±0.002 ^b
黔薯11	32.433±0.907 ^{bc}	55.305±1.443 ^e	22.528±0.568 ^c	0.101±0.003 ^b	0.595±0.010 ^a	0.641±0.012 ^a	0.054±0.001 ^a
商薯19	30.763±0.522 ^{bcd}	57.419±0.986 ^e	16.468±0.328 ^d	0.056±0.001 ^g	0.600±0.021 ^a	0.485±0.012 ^c	0.053±0.001 ^a
徐薯22	28.757±1.791 ^d	63.685±1.919 ^{bc}	28.494±0.568 ^a	0.081±0.001 ^d	0.382±0.012 ^c	0.394±0.009 ^e	0.053±0.001 ^a
渝薯15	26.507±0.860 ^e	63.441±1.308 ^{bc}	24.801±0.752 ^b	0.075±0.002 ^c	0.536±0.014 ^b	0.404±0.009 ^c	0.045±0.001 ^{bc}
徐薯37	36.787±2.348 ^a	60.416±1.798 ^d	16.563±0.284 ^d	0.074±0.003 ^c	0.403±0.013 ^c	0.433±0.011 ^d	0.054±0.001 ^a
齐宁19	30.630±0.674 ^{cd}	67.370±0.977 ^a	26.222±1.863 ^b	0.062±0.002 ^f	0.271±0.009 ^d	0.303±0.009 ^f	0.041±0.000 ^d
渝薯50	30.203±1.473 ^{cd}	61.365±0.125 ^{cd}	22.434±0.328 ^c	0.038±0.002 ^h	0.216±0.007 ^e	0.309±0.001 ^f	0.040±0.001 ^d
渝薯198	33.100±1.507 ^b	65.717±0.755 ^{ab}	28.116±1.565 ^a	0.087±0.003 ^c	0.380±0.002 ^c	0.169±0.001 ^g	0.043±0.000 ^c
平均值	31.156	60.568	22.528	0.079	0.416	0.436	0.048
标准差	2.833	4.466	4.370	0.023	0.144	0.151	0.005
变异系数(%)	9.092	7.372	19.398	28.760	34.640	34.620	11.480
极差	13.350	14.823	13.646	0.080	0.400	0.480	0.020

注: 同列小写字母不相同表示差异显著($P<0.05$), 表4~表6同。

粉粒组成,表面光滑,形状为圆形、椭圆形和多边形,与前人关于甘薯淀粉颗粒形貌的研究结果基本一致^[21-24]。其中黔薯 11、徐薯 22 和渝薯 15 的小淀粉粒以多边形占比较大,而徐薯 37、齐宁 19 和渝薯 50 小淀粉粒以圆形为主。由表 2 可知,各甘薯品种

表 2 不同甘薯品种淀粉粒径分布

Table 2 Granule size and distribution of starch from different sweet potato varieties

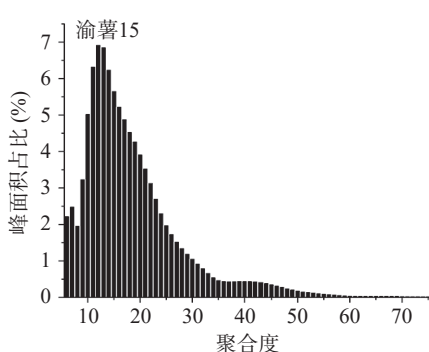
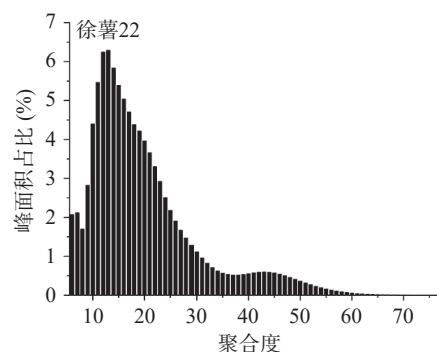
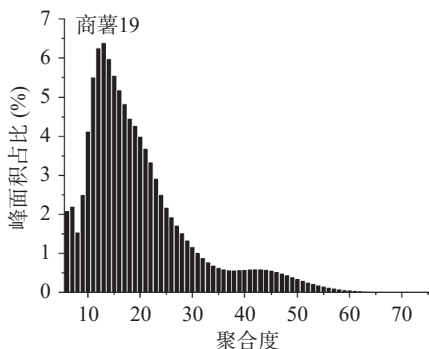
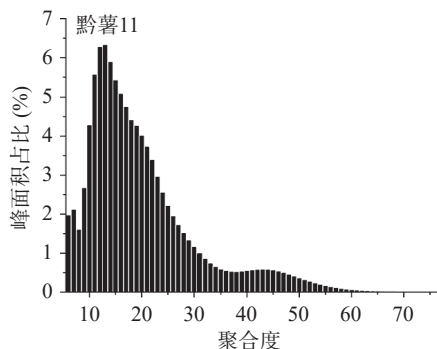
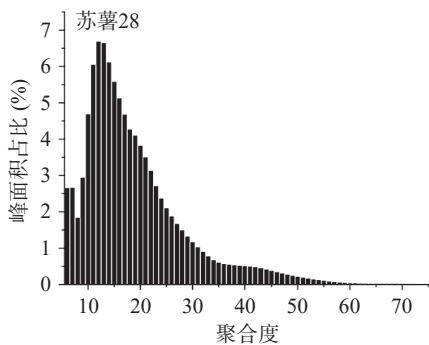
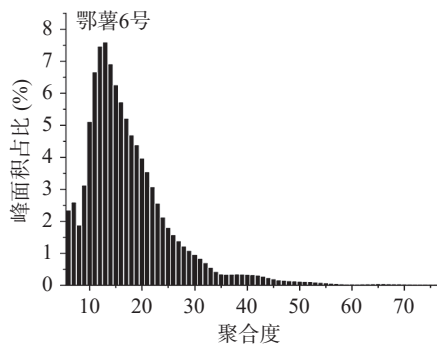
品种	D[4,3] (μm)	D[3,2] (μm)	D[1,0] (μm)	Dx(10) (μm)	Dx(50) (μm)	Dx(90) (μm)
鄂薯6号	16.00	13.15	9.02	7.96	14.65	26.15
苏薯28	16.65	13.75	9.57	8.36	15.35	26.90
黔薯11	15.85	12.80	8.50	7.65	14.45	26.05
商薯19	20.95	15.90	9.36	8.94	18.75	36.25
徐薯22	15.70	13.30	9.55	8.25	14.70	24.75
渝薯15	17.25	14.40	10.10	8.89	16.05	27.25
徐薯37	15.90	12.75	8.47	7.57	14.35	26.50
齐宁19	18.70	15.55	10.90	9.57	17.30	30.05
渝薯50	19.35	15.55	10.25	9.24	17.65	32.00
渝薯198	19.50	16.10	11.10	9.83	18.00	31.40

注: D[4,3]: 体积加权平均直径; D[3,2]: 表面积加权平均直径; D[1,0]: 数量加权平均直径; Dx(10): 10%淀粉颗粒直径小于该值; Dx(50): 50%淀粉颗粒直径小于该值; Dx(90): 90%淀粉颗粒直径小于该值。

体积加权平均直径、表面积加权平均直径和数量加权平均直径范围分别为: 15.70~20.95、12.75~16.10、8.47~11.10 μm 。Dx(10)、Dx(50)、Dx(90)分别代表小于当前数值的淀粉颗粒所占百分比,对应不同品种甘薯淀粉颗粒直径大小范围分别为 7.57~9.83、14.35~18.75、24.75~36.25 μm ,说明不同品种间淀粉粒径存在差异,本试验测定的品种淀粉粒径大于 Li 等^[7]和 Guo 等^[14]的研究结果。总体来看,商薯 19、渝薯 50、渝薯 198、齐宁 19 平均粒径较大,而黔薯 11、徐薯 22、徐薯 37 平均粒径较小。相关研究表明 D[4,3] 和 D[3,2] 越接近表明样品的形状越规则,粒径分布越集中^[25],所以商薯 19 淀粉颗粒不规则,徐薯 22 较为规则。

2.3 淀粉分子聚合度

根据淀粉分子结构模型,淀粉颗粒中的支链淀粉分子由 A、B、C 链组成,通过异淀粉酶将支链淀粉水解为不同长度的葡聚糖链,淀粉链长分布反映不同聚合度葡聚糖链的含量^[26]。根据峰面积作图,各甘薯品种峰面积图有一定的相似性,支链淀粉聚在 DP8 处呈低谷水平,在 DP12~13 处和 DP $\geq$ 37 处分别有一个峰(图 2)。将链长分布分为四个部分,DP $\leq$ 12、DP13~24、DP25~36 和 DP $\geq$ 37。其中,中



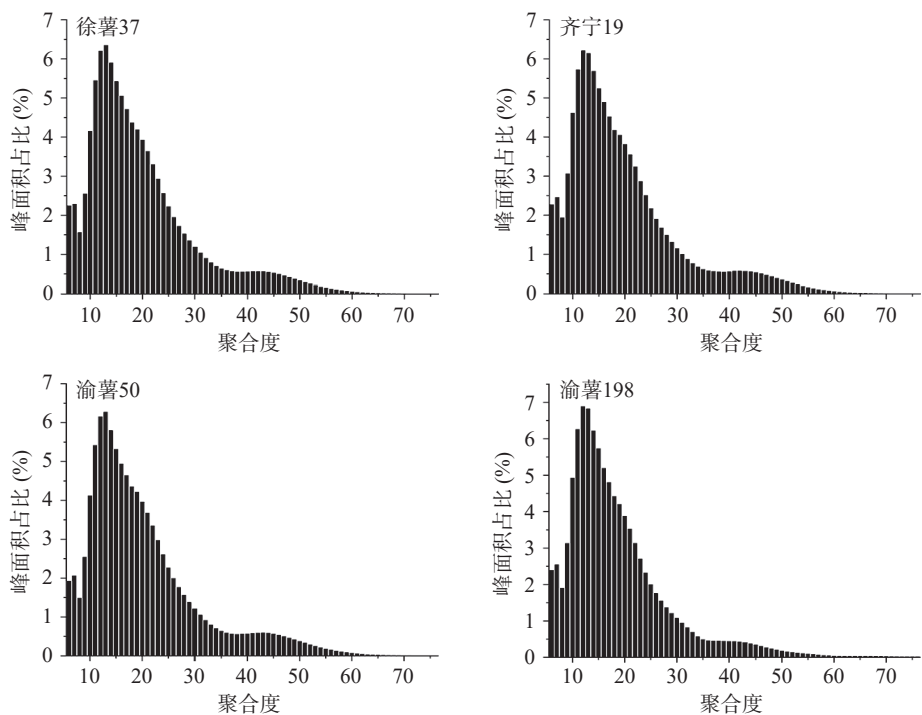


图 2 不同甘薯品种淀粉链长分布图

Fig.2 Starch chain length distribution of different sweet potato varieties

间链 DP13~24 和 DP25~36 所占比例较高, 分别为 45.36%~54.98% 和 18.09%~21.70%; 短链 DP≤12 比例在 11.67%~16.43%; 长链 DP≥37 在 10.50%~21.35%; 淀粉分子平均聚合度 (DPn) 在 17.55~20.16 之间, 均值为 19.24。鄂薯 6 号短链占比最高, 而长链占比最低, 且平均聚合度最低; 渝薯 50 短链占比最低, 而长链占比最高, 且平均聚合度最高 (表 3)。本试验结果与李艺博^[27] 研究不同甘薯品种淀粉链长 DP≤12、DP25~36 和 DPn 存在较大差异, 淀粉链长分布可能受到淀粉合成相关基因多样性和生长环境的影响。

表 3 不同甘薯品种淀粉分子聚合度

Table 3 Starch chain length distribution of different sweet potato varieties

品种	DP≤12(%)	DP13~24(%)	DP25~36(%)	DP≥37(%)	DPn
鄂薯6号	16.43	54.98	18.09	10.50	17.55
苏薯28	14.30	48.28	21.70	15.73	18.80
黔薯11	12.24	46.98	20.68	20.09	19.78
商薯19	12.09	47.19	20.95	19.77	19.75
徐薯22	12.37	46.42	20.20	21.00	19.82
渝薯15	15.01	50.10	19.64	15.25	18.51
徐薯37	12.15	46.52	21.37	19.96	19.80
齐宁19	13.07	45.36	20.90	20.66	19.68
渝薯50	11.67	45.59	21.39	21.35	20.16
渝薯198	14.88	49.77	20.12	15.23	18.55

2.4 淀粉热力学特性分析

淀粉悬浮液被加热到一定温度时, 淀粉内部分子秩序被破坏, 淀粉悬浮液变成具有粘度的浆糊的过程被称为糊化; 糊化的淀粉在温度降低的过程中, 分

子间氢键相互吸引, 淀粉分子重新转化为有序状态的过程被称为淀粉老化^[28]。差式量热扫描仪(DSC)可有效测定淀粉的糊化焓值变化和温度参数, 反映淀粉的热力学特性^[26-29]。如表 4 所示, 不同甘薯品种之间淀粉热力学特性参数均存在差异($P<0.05$)。T₀ 变化范围为 61.67~71.55 ℃, 黔薯 11、渝薯 15 和渝薯 50 显著高于其余品种($P<0.05$), 徐薯 37 则低于其余品种; T_p 变化范围为 69.47~77.25 ℃, 其中渝薯 50 和黔薯 11 最高, 而商薯 19 和徐薯 37 低于其余品种; T_c 的变化范围分别为 83.63~87.82 ℃。总体来看, 黔薯 11、渝薯 15 和渝薯 50 有较高的糊化温度, 而徐薯 37、苏薯 28 糊化温度较低。ΔH 和 ΔHr 变化范围分别为 8.90~14.65 J/g 和 2.24~4.68 J/g, 其中徐薯 37 最高, 渝薯 50 最低。本试验与 Zhu 等^[22] 研究不同基因型甘薯淀粉热力学特性结果相似。此外, Cooke 等^[30] 提出糊化焓值可以间接反映淀粉晶体结构, 所以本研究中徐薯 37 淀粉形成的结晶更加致密、有序, 而渝薯 50 的结构较为疏松。

2.5 淀粉糊化特性分析

糊化特性是反应淀粉蒸煮和加工品质的重要指标, 与直链淀粉含量、淀粉链长分布和淀粉晶体结构密切相关^[31]。如表 5 所示, 不同甘薯品种淀粉糊化特性参数均存在显著差异性($P<0.05$)。峰值粘度变化范围 5585.33~6432.00 cP, 苏薯 28 和渝薯 50 峰值粘度显著高于其余品种($P<0.05$), 徐薯 37 则显著低于其余品种 ($P<0.05$); 最低粘度变化范围为 2724.00~3377.67 cP, 鄂薯 6 号和苏薯 28 显著高于其余品种 ($P<0.05$), 渝薯 198 显著低于其余品种 ($P<0.05$); 衰减值变化范围为 2722.33~3665.00 cP,

表 4 不同甘薯品种淀粉热力学特性分析

Table 4 Thermal properties of starch from different sweet potato varieties

品种	T ₀ (℃)	T _p (℃)	T _c (℃)	ΔH(J/g)	ΔHr(J/g)
鄂薯6号	65.44±0.35 ^d	74.44±0.90 ^c	87.17±0.36 ^{ab}	9.36±0.16 ^c	3.28±0.35 ^{bcd}
苏薯28	62.41±0.34 ^{ef}	71.94±0.23 ^d	83.63±0.96 ^d	14.65±0.93 ^a	3.57±0.39 ^{bc}
黔薯11	71.55±0.40 ^a	77.17±0.80 ^a	86.56±0.08 ^{ab}	9.55±0.61 ^c	2.85±0.43 ^{cd}
商薯19	62.92±0.52 ^c	69.47±1.31 ^e	87.82±1.41 ^a	13.14±1.28 ^{ab}	3.07±0.17 ^{bcd}
徐薯22	67.39±0.29 ^c	74.20±0.25 ^c	84.69±0.83 ^{cd}	12.79±0.86 ^b	3.34±1.01 ^{bcd}
渝薯15	71.21±0.26 ^a	76.40±0.53 ^{ab}	86.49±0.21 ^{ab}	10.42±0.98 ^c	2.89±0.31 ^{bcd}
徐薯37	61.67±1.27 ^f	70.61±2.00 ^{de}	85.95±1.16 ^{bc}	14.53±0.58 ^a	4.68±0.37 ^a
齐宁19	67.22±0.40 ^c	75.21±1.00 ^{bc}	86.41±0.59 ^{ab}	9.72±0.44 ^c	4.04±0.47 ^{ab}
渝薯50	71.28±0.35 ^a	77.25±1.39 ^a	87.57±1.13 ^{ab}	8.90±0.49 ^c	2.24±0.10 ^d
渝薯198	69.08±0.56 ^b	74.33±0.17 ^c	86.06±1.02 ^{bc}	11.98±1.60 ^b	2.43±1.34 ^{cd}
平均值	67.02	74.10	86.24	11.50	3.24
标准差	3.69	2.71	1.43	2.24	0.87
变异系数(%)	5.51	3.66	1.66	19.45	26.81
极差	10.99	10.51	6.76	7.28	3.72

表 5 不同甘薯品种淀粉糊化特性

Table 5 Pasting properties of starch from different varieties of sweet potatoes

品种	峰值粘度(cP)	最低粘度(cP)	衰减值(cP)	最终粘度(cP)	回生值(cP)	峰值时间(min)	糊化温度(℃)
鄂薯6号	6183.33±59.70 ^{bc}	3374.00±31.00 ^a	2806.00±28.51 ^c	4101.00±36.06 ^c	719.00±6.56 ^f	4.90±0.03 ^a	78.33±0.08 ^c
苏薯28	6432.00±53.36 ^a	3377.67±2.52 ^a	3074.33±49.65 ^d	4228.67±7.02 ^a	852.00±5.57 ^c	4.37±0.04 ^f	77.35±0.54 ^{cd}
黔薯11	6013.67±78.16 ^d	2854.00±35.37 ^c	3168.67±43.06 ^c	3704.67±22.81 ^e	846.33±16.65 ^{cd}	4.54±0.05 ^d	79.81±0.37 ^b
商薯19	5910.33±37.07 ^e	3187.33±8.02 ^b	2722.33±29.01 ^f	4152.67±8.74 ^b	963.00±2.65 ^a	4.63±0.04 ^c	77.52±0.03 ^{cd}
徐薯22	6036.67±5.86 ^d	2834.67±34.00 ^{cd}	3202.00±33.41 ^c	3643.33±17.47 ^f	805.67±17.01 ^e	4.46±0.07 ^c	78.32±0.03 ^c
渝薯15	5970.33±76.74 ^{de}	2814.33±14.50 ^d	3141.67±57.54 ^{cd}	3644.00±5.57 ^f	829.67±9.07 ^d	4.50±0.03 ^{de}	81.00±1.73 ^a
徐薯37	5585.33±34.65 ^f	2814.33±10.50 ^d	2767.67±45.06 ^{ef}	3756.33±10.07 ^d	941.00±20.66 ^b	4.64±0.04 ^c	77.50±0.10 ^{cd}
齐宁19	6424.67±16.26 ^a	2761.33±6.43 ^c	3665.00±21.07 ^a	3437.67±2.52 ^h	678.00±3.61 ^g	4.35±0.03 ^f	76.63±0.08 ^d
渝薯50	6263.67±30.57 ^b	3177.00±9.85 ^b	3087.67±40.50 ^d	3785.33±24.50 ^d	608.67±15.28 ^h	4.70±0.03 ^b	79.91±0.07 ^b
渝薯198	6124.33±53.26 ^c	2724.00±23.52 ^f	3407.33±29.09 ^b	3507.00±16.52 ^g	787.00±9.85 ^c	4.20±0.01 ^g	78.38±0.03 ^c
平均值	6094.43	2991.87	3104.27	3796.07	803.03	4.53	78.48
标准差	248.20	249.55	284.23	264.83	107.32	0.20	1.41
变异系数(%)	4.07	8.34	9.16	6.98	13.36	4.32	1.79
极差	944.00	705.00	992.00	801.00	373.00	0.73	6.46

齐宁 19 显著高于其余品种($P<0.05$), 而商薯 19 衰减最低; 最终粘度变化范围为 3437.67~4228.67 cP, 苏薯 28 显著高于其余品种($P<0.05$), 齐宁 19 显著低于其余品种($P<0.05$); 回生值变化范围为 608.67~963.00 cP, 变异系数为 13.36%, 品种间差异较大, 回生值较高的品种有商薯 19、徐薯 37, 较低品种有齐宁 19 和渝薯 50; 峰值时间 4.20~4.90 min, 变异系数为 4.32%, 鄂薯 6 号峰值时间最长, 渝薯 198 峰值时间最短; 糊化温度的范围为 76.63~81.00℃, 渝薯 15 糊化温度最高, 齐宁 19 最低。孙健等^[32]研究 15 个淀粉型甘薯品种 RVA 谱特征值结果总体低于本研究结果, 这可能与所研究的甘薯品种和的淀粉提取方法的差异有关。

2.6 甘薯粉条品质分析

烹煮特性和质构特性是评价甘薯粉条品质的重要参数^[23]。本试验不同品种粉条品质分析结果见表 6。不同品种断条率变化范围为 4.35%~61.54%,

苏薯 28、黔薯 11、商薯 19 断条率显著低于其余品种($P<0.05$), 而渝薯 50 在烹煮过程中断条严重, 显著高于其余品种($P<0.05$); 膨胀系数变化范围为 142.15~209.60, 徐薯 37 膨胀系数最高, 苏薯 28 最低; 蒸煮损失变化范围为 10.48%~17.56%, 蒸煮损失较高的有鄂薯 6 号、渝薯 198; 干物质的量变化范围为 82.44%~89.52%, 品种间差异未达到显著水平; 粉条硬度变化范围 62.97~210.13 N, 其中渝薯 198 粉条质地最硬, 显著高于其余品种($P<0.05$), 粘附性变化范围为 0.02~0.48 N, 其中徐薯 37 和渝薯 50 显著高于其余品种($P<0.05$); 内聚性变化范围为 0.60~0.77 Ratio, 其中鄂薯 6 号较高; 粉条弹性变化范围为 1.38~2.48 mm, 商薯 19、渝薯 15 和渝薯 198 弹性较好, 而徐薯 37 显著低于其余品种($P<0.05$); 胶粘性变化范围为 46.97~129.50 N, 渝薯 198 显著高于其余品种($P<0.05$); 粉条咀嚼性变化范围为 68.40~307.07 mJ, 渝薯 198 显著高于其余品种($P<0.05$)。

表 6 不同甘薯品种粉条的烹煮和质构特性分析

Table 6 Cooking and texture properties of noodles from different sweet potato varieties

品种	断条率(%)	膨胀系数	蒸煮损失(%)	干物质的量(%)	硬度(N)	粘附性(N)	内聚性(Ratio)	弹性(mm)	胶粘性(N)	咀嚼性(mJ)
鄂薯6号	20.00±1.15 ^c	171.80±10.24 ^{bcd}	17.56±2.02 ^a	82.44±10.46 ^a	62.97±25.04 ^c	0.15±0.11 ^b	0.77±0.06 ^a	1.70±0.18 ^d	46.97±14.98 ^e	81.00±33.44 ^{de}
苏薯28	4.35±1.14 ^c	142.15±8.44 ^a	14.57±1.82 ^{ab}	85.43±4.57 ^a	77.13±23.60 ^{de}	0.22±0.05 ^b	0.67±0.06 ^{ab}	1.73±0.22 ^d	51.13±21.35 ^e	89.20±39.20 ^{de}
黔薯11	5.88±1.62 ^c	153.25±17.51 ^{de}	12.99±2.24 ^{ab}	87.01±6.11 ^a	103.13±15.21 ^{bcd}	0.06±0.05 ^b	0.67±0.06 ^{ab}	2.21±0.19 ^{ab}	67.83±10.64 ^{bc}	149.87±29.10 ^{cd}
商薯19	8.33±0.61 ^c	183.50±6.30 ^{abc}	12.43±4.68 ^{ab}	87.57±5.71 ^a	144.53±26.22 ^b	0.02±0.01 ^b	0.67±0.06 ^{ab}	2.48±0.12 ^a	94.27±14.28 ^b	234.37±44.66 ^b
徐薯22	13.64±3.77 ^d	195.09±20.85 ^{ab}	12.46±2.16 ^{ab}	87.54±6.51 ^a	90.37±25.08 ^{cde}	0.16±0.10 ^b	0.60±0.10 ^b	1.80±0.31 ^{cd}	51.70±7.89 ^e	93.43±21.51 ^{de}
渝薯15	21.74±5.20 ^c	165.19±16.35 ^{cde}	13.14±1.44 ^{ab}	86.86±7.50 ^a	121.07±39.91 ^{bcd}	0.14±0.12 ^b	0.70±0.00 ^{ab}	2.34±0.31 ^a	85.30±27.08 ^b	204.30±90.28 ^{bc}
徐薯37	23.81±3.05 ^c	209.60±22.29 ^a	13.41±2.75 ^{ab}	86.59±5.29 ^a	78.20±17.67 ^{de}	0.48±0.31 ^a	0.67±0.12 ^{ab}	1.38±0.13 ^e	50.23±14.59 ^e	68.40±15.80 ^e
齐宁19	14.29±2.66 ^d	177.35±17.83 ^{bcd}	10.48±2.24 ^b	89.52±4.98 ^a	129.73±7.47 ^{bc}	0.12±0.03 ^b	0.70±0.00 ^{ab}	1.93±0.01 ^{bcd}	90.50±3.99 ^b	175.10±7.56 ^{bc}
渝薯50	61.54±2.59 ^a	174.56±6.00 ^{bcd}	14.06±1.50 ^{ab}	85.94±7.03 ^a	151.47±32.70 ^b	0.45±0.09 ^a	0.60±0.00 ^b	2.13±0.07 ^{abc}	95.33±19.23 ^b	202.73±35.36 ^{bc}
渝薯198	29.41±4.91 ^b	196.95±12.53 ^{ab}	17.26±5.56 ^a	82.74±2.13 ^a	210.13±39.28 ^a	0.03±0.01 ^b	0.63±0.12 ^{ab}	2.37±0.04 ^a	129.50±11.57 ^a	307.07±32.87 ^a
均值	20.30	176.94	13.84	86.16	116.87	0.18	0.67	2.01	76.28	160.55
标准差	16.23	23.35	3.22	5.69	48.33	0.18	0.08	0.38	29.36	82.95
变异系数(%)	0.80	0.13	0.23	0.07	0.41	1.01	0.11	0.19	0.38	0.52
全距	60.95	101.56	13.64	24.81	206.90	0.82	0.30	1.45	109.3	290.5

2.7 淀粉性质与粉条品质相关性分析

采用 Pearson 相关系数分析淀粉性质与粉条品质参数之间的相关性,结果见表 7。粉条断条率与淀粉粗脂肪含量呈显著负相关($P<0.05$),可能是因为脂肪与淀粉颗粒结合改变了淀粉分子之间的作用力;DPn 与粉条蒸煮损失和内聚力呈显著负相关($P<0.05$),而与干物质的量呈显著正相关($P<0.05$);淀粉灰分含量与粉条硬度呈极显著负相关($P<0.01$),而与胶粘性和咀嚼性均呈显著负相关($P<0.05$);淀粉粒径与粉条弹性呈显著正相关($P<0.05$),而与粉条硬度、胶粘性和咀嚼性均呈极显著正相关($P<0.01$),说明淀粉颗粒越大制作的粉条弹性越好并且更加柔软;此外粉条弹性和咀嚼性与 ΔHr 呈显著负相关($P<0.05$)。相关性分析表明,粉条品质主要与甘薯淀粉组分、淀粉颗粒大小以及分子结构密切相关,但与淀粉糊化特性无显著相关性。谭洪卓等^[33]研究发现甘薯淀粉理化性质、分子结构对粉条品质影响较大,与本研究结果具有一定相似性;但快速粘度分析参数与粉条品质具有显著相关性,与本研究结果存在明显差异,这可能是由于所研究甘薯品种和粉条制作工艺不同导致的。候夫云等^[23]研究发现淀粉的峰值粘度、最终粘

度、回生值与其粉条硬度呈负相关,与本研究结果具有一定的相似性。本研究中,淀粉性质与粉条品质参数之间存在相关性,为了更好地评价不同品种淀粉的综合品质特性,需要采用主成分分析法对各品种淀粉品质进行综合分析。

2.8 主成分分析

本研究采用主成分分析利用降维的方法把多个指标简化为少数综合性指标,并且保留原指标包含的主要信息^[34-35]。本研究对 10 个甘薯品种的淀粉性质和粉条品质指标进行主成分分析结果如表 8 所示。以特征值 >1 ,方差贡献率累计达到 85% 以上为选择标准,共提取 7 个主成分,贡献率累计达到 96.761%,因此提取的 7 个主成分可以对淀粉性质及其粉条品质指标进行综合评价,并且载荷值的绝对值越大即代表该指标对主成分的影响越重要。主成分 1(Z1)特征值为 9.291,方差贡献率为 33.182%,说明主成分 1 在分析评价中起主导作用,综合了直链淀粉、灰分、磷含量、D[4,3]、D[3,2]、起始糊化温度、峰值温度、回生焓变、衰减值和粉条的硬度、弹性、胶粘性和咀嚼性的信息;主成分 2(Z2)的特征值和方差贡献率分别为 4.548 和 16.243%,主要反应淀粉糊

表 7 淀粉性质与粉条品质参数的相关性分析

Table 7 Correlation analysis between starch properties and noodles quality parameters

指标	直链淀粉	粗蛋白	粗脂肪	灰分	磷	D[4,3]	D[3,2]	DPn	To	Tp	Tc	ΔH	ΔHr	峰值粘度	最低粘度	衰减值	最终粘度	回生值	峰值时间	糊化温度
断条率	0.087	-0.572	-0.642*	-0.580	-0.562	0.317	0.366	0.157	0.415	0.403	0.417	-0.405	-0.434	0.043	0.003	0.026	-0.249	-0.616	0.237	0.396
膨胀系数	0.023	-0.345	-0.347	-0.625	0.193	0.152	0.140	0.236	-0.217	-0.347	0.175	0.268	0.265	-0.585	-0.490	-0.089	-0.402	0.151	-0.013	-0.272
蒸煮损失	-0.103	0.518	-0.251	0.019	-0.173	-0.083	-0.055	-0.729*	-0.016	0.021	0.009	-0.038	-0.366	0.066	0.369	-0.264	0.293	-0.139	0.179	0.146
干物质的量	0.103	-0.518	0.251	-0.019	0.173	0.083	0.055	0.729*	0.016	-0.021	-0.009	0.038	0.366	-0.066	-0.369	0.264	-0.293	0.139	-0.179	-0.146
硬度	0.426	-0.489	-0.048	-0.770**	-0.472	0.803**	0.864**	0.145	0.428	0.173	0.349	-0.185	-0.598	0.113	-0.387	0.439	-0.452	-0.197	-0.501	0.141
粘附性	-0.313	-0.359	-0.409	-0.066	-0.073	-0.231	-0.262	0.341	-0.178	-0.032	-0.058	0.133	0.317	-0.205	0.130	-0.295	0.049	-0.178	0.362	0.033
内聚性	-0.409	0.489	-0.043	0.432	-0.038	-0.222	-0.244	-0.683*	-0.229	-0.064	0.224	-0.243	0.325	0.065	0.275	-0.194	0.278	0.033	0.383	-0.120
弹性	0.268	-0.316	0.362	-0.287	-0.219	0.686*	0.673*	0.046	0.553	0.267	0.472	-0.342	-0.764*	0.090	-0.163	0.218	-0.160	-0.009	-0.255	0.445
胶粘性	0.388	-0.489	-0.044	-0.742*	-0.533	0.829**	0.890**	0.083	0.443	0.203	0.417	-0.262	-0.578	0.151	-0.370	0.455	-0.446	-0.222	-0.469	0.155
咀嚼性	0.347	-0.432	0.095	-0.639*	-0.438	0.822**	0.859**	0.033	0.462	0.186	0.444	-0.253	-0.658*	0.099	-0.317	0.363	-0.355	-0.122	-0.424	0.245

注: *表示在0.05水平(双侧)上显著相关, **表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

表 8 主成分特征值、方差贡献率、累计贡献率及成分载荷矩阵

Table 8 Eigenvalue, variance contribution rate, cumulative contribution rate and principal component loading matrix

指标	成分						
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
直链淀粉(X ₁)	0.656	-0.125	-0.603	0.320	-0.061	-0.026	-0.135
粗蛋白(X ₂)	-0.504	-0.455	-0.115	0.572	-0.104	-0.380	-0.031
粗脂肪(X ₃)	-0.235	0.347	0.241	0.739	0.349	0.252	0.033
灰分(X ₄)	-0.774	-0.341	0.223	0.296	0.160	0.302	0.110
磷(X ₅)	-0.664	0.390	0.015	0.236	0.500	-0.062	0.019
D[4,3](X ₆)	0.646	0.395	0.557	-0.119	-0.269	0.148	0.087
D[3,2](X ₇)	0.788	0.290	0.367	-0.073	-0.367	0.096	0.059
DPn(X ₈)	0.150	0.530	-0.246	-0.312	0.349	0.588	0.003
To(X ₉)	0.713	-0.465	-0.138	0.072	0.498	0.028	-0.050
Tp(X ₁₀)	0.547	-0.697	-0.285	-0.037	0.349	0.075	-0.002
Tc(X ₁₁)	0.342	-0.057	0.614	-0.466	0.331	-0.147	0.375
ΔH(X ₁₂)	-0.511	0.690	-0.079	0.261	-0.254	0.001	-0.325
ΔHr(X ₁₃)	-0.645	0.336	-0.435	-0.180	-0.225	-0.053	0.403
峰值粘度(X ₁₄)	0.336	-0.526	-0.081	0.123	-0.636	0.418	0.023
最低粘度(X ₁₅)	-0.445	-0.379	0.591	-0.123	-0.365	0.316	-0.224
衰减值(X ₁₆)	0.680	-0.123	-0.594	0.227	-0.243	0.096	0.208
最终粘度(X ₁₇)	-0.639	-0.107	0.641	0.063	-0.238	0.255	-0.196
回生值(X ₁₈)	-0.526	0.631	0.202	0.444	0.249	-0.101	0.030
峰值时间(X ₁₉)	-0.466	-0.347	0.457	-0.577	0.300	-0.047	0.078
糊化温度(X ₂₀)	0.317	-0.444	0.136	0.071	0.714	-0.028	-0.275
膨胀系数(X ₂₁)	0.092	0.621	-0.187	-0.447	0.053	-0.558	-0.060
干物质的量(X ₂₂)	0.060	0.393	-0.334	-0.070	0.252	0.611	0.505
硬度(X ₂₃)	0.887	0.316	0.224	0.075	-0.073	-0.132	-0.121
粘附性(X ₂₄)	-0.272	0.042	-0.234	-0.744	0.066	0.153	-0.382
内聚性(X ₂₅)	-0.371	-0.436	0.254	0.068	-0.191	-0.339	0.631
弹性(X ₂₆)	0.715	0.079	0.507	0.372	0.251	0.099	0.076
胶粘性(X ₂₇)	0.899	0.256	0.271	0.076	-0.089	-0.128	0.004
咀嚼性(X ₂₈)	0.861	0.238	0.382	0.188	0.002	-0.119	-0.003
特征值	9.291	4.548	3.844	3.128	2.831	1.955	1.495
方差贡献率(%)	33.182	16.243	13.727	11.173	10.112	6.984	5.340
累计贡献率(%)	33.182	49.425	63.152	74.325	84.437	91.421	96.761

化焙、回生值以及粉条的膨胀系数;主成分 3(Z3)的特征值和方差贡献率分别为 3.844 和 13.727%,主要代表终止糊化温度、最低粘度和最终粘度的信息;主成分 4(Z4)的特征值和方差贡献率分别为 3.128 和 11.173%,主要代表粗蛋白、粗脂肪含量、峰值时间以及粉条的粘附性的信息;主成分 5(Z5)的特征值和方差贡献率分别为 2.831 和 10.112%,在淀粉的峰值粘度和糊化温度有较大载荷值;主成分 6(Z6)的特征值和方差贡献率分别为 1.955 和 6.984%,在淀粉分子聚合度和粉条干物质的量有较大载荷值;主成分 7(Z7)的特征值和方差贡献率分别为 1.495 和 5.34%,在粉条内聚性有较大载荷值。

根据特征值和相应的特征向量,按照公式计算了 10 个甘薯品种的各主成分得分。

$$Y_1=0.215X_1-0.165X_2-0.077X_3-0.254X_4-0.218X_5+0.212X_6+0.259X_7+0.049X_8+0.234X_9+0.18X_{10}+0.112X_{11}-0.168X_{12}-0.212X_{13}+0.11X_{14}-0.146X_{15}+0.223X_{16}-0.21X_{17}-0.173X_{18}-0.153X_{19}+0.104X_{20}+0.03X_{21}+0.02X_{22}+0.291X_{23}-0.089X_{24}-0.122X_{25}+0.235X_{26}+0.295X_{27}+0.282X_{28}$$

$$Y_2=-0.058X_1-0.213X_2+0.163X_3-0.16X_4+0.183X_5+0.185X_6+0.136X_7+0.248X_8-0.218X_9-0.327X_{10}-0.027X_{11}+0.324X_{12}+0.158X_{13}-0.247X_{14}-0.178X_{15}-0.058X_{16}-0.05X_{17}+0.296X_{18}-0.163X_{19}-0.208X_{20}+0.291X_{21}+0.184X_{22}+0.148X_{23}+0.02X_{24}-0.204X_{25}+0.037X_{26}+0.12X_{27}+0.112X_{28}$$

$$Y_3=-0.307X_1-0.059X_2+0.123X_3+0.114X_4+0.008X_5+0.284X_6+0.187X_7-0.125X_8-0.07X_9-0.146X_{10}+0.313X_{11}-0.041X_{12}-0.222X_{13}-0.042X_{14}+0.301X_{15}-0.303X_{16}+0.327X_{17}+0.103X_{18}+0.233X_{19}+0.069X_{20}-0.096X_{21}-0.17X_{22}+0.114X_{23}-0.119X_{24}+0.13X_{25}+0.259X_{26}+0.138X_{27}+0.195X_{28}$$

$$Y_4=0.181X_1+0.323X_2+0.418X_3+0.167X_4+0.133X_5-0.067X_6-0.041X_7-0.176X_8+0.041X_9-0.021X_{10}-0.263X_{11}+0.147X_{12}-0.102X_{13}+0.069X_{14}-0.069X_{15}+0.128X_{16}+0.035X_{17}+0.251X_{18}-0.326X_{19}+0.04X_{20}-0.253X_{21}-0.039X_{22}+0.043X_{23}-0.421X_{24}+0.039X_{25}+0.21X_{26}+0.043X_{27}+0.107X_{28}$$

$$Y_5=-0.036X_1-0.062X_2+0.207X_3+0.095X_4+0.297X_5-0.16X_6-0.218X_7+0.207X_8+0.296X_9+0.207X_{10}+0.197X_{11}-0.151X_{12}-0.134X_{13}-0.378X_{14}-0.217X_{15}-0.144X_{16}-0.142X_{17}+0.148X_{18}+0.178X_{19}+0.424X_{20}+0.031X_{21}+0.15X_{22}-0.043X_{23}+0.039X_{24}-0.114X_{25}+0.149X_{26}-0.053X_{27}+0.001X_{28}$$

$$Y_6=-0.019X_1-0.271X_2+0.18X_3+0.216X_4-0.044X_5+0.106X_6+0.069X_7+0.421X_8+0.02X_9+0.053X_{10}-0.105X_{11}+0.001X_{12}-0.038X_{13}+0.299X_{14}+0.226X_{15}+0.069X_{16}+0.183X_{17}-0.072X_{18}-0.033X_{19}-0.02X_{20}-0.399X_{21}+0.437X_{22}-0.094X_{23}+0.11X_{24}-0.243X_{25}+0.071X_{26}-0.091X_{27}-0.085X_{28}$$

$$Y_7=-0.111X_1-0.026X_2+0.027X_3+0.09X_4+0.016X_5+0.072X_6+0.048X_7+0.002X_8-0.041X_9-0.001X_{10}+0.307X_{11}-0.266X_{12}+0.33X_{13}+0.019X_{14}-0.184X_{15}+0.17X_{16}-0.161X_{17}+0.025X_{18}+0.064X_{19}-0.225X_{20}-0.049X_{21}+0.413X_{22}-0.099X_{23}-0.312X_{24}+0.516X_{25}+0.062X_{26}+0.004X_{27}-0.003X_{28}$$

以 7 个主成分所对应的方差贡献率为权重,计算各品种淀粉品质的综合得分: $Y=0.33182Y_1+0.16243Y_2+0.13727Y_3+0.11173Y_4+0.10112Y_5+0.06984Y_6+0.0534Y_7$ 。

其中渝薯 198、商薯 19、渝薯 50、渝薯 15、齐宁 19 和黔薯 11 综合得分为正值,可能其淀粉综合品质较好,而徐薯 22、苏薯 28、徐薯 37 和鄂薯 6 号得分为负值可能淀粉综合品质较差,不适宜作为粉条加工品种(表 9)。

表 9 不同甘薯品种的主成分得分、综合得分及排名

Table 9 Principal component scores, comprehensive scores and ranking of different sweet potato varieties

品种	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y	排名
鄂薯6号	-3.1531	-3.8137	1.6291	-1.0467	-0.9878	-1.8323	0.5213	-1.7591	10
苏薯28	-3.3256	-0.6161	-0.1523	2.0362	-2.5373	1.7806	-1.1883	-1.1926	8
黔薯11	-0.3704	-1.47	-0.3381	1.8856	2.8727	0.7139	0.6145	0.1757	6
商薯19	-0.3963	3.2924	4.0283	0.3455	0.0808	0.7698	0.8154	1.1003	2
徐薯22	-0.7712	0.7757	-2.8357	0.2834	0.7192	0.1978	-0.9139	-0.4497	7
渝薯15	1.582	-1.0393	0.2179	1.134	1.7688	-0.4478	0.3715	0.6802	4
徐薯37	-4.3153	2.8882	-1.3533	-2.0668	0.7748	-1.1888	-0.1305	-1.3911	9
齐宁19	2.6564	0.1267	-2.1952	-0.8205	-1.941	0.7649	2.5085	0.5001	5
渝薯50	3.3944	-1.2924	0.8956	-3.2605	0.4973	1.5497	-1.4844	0.7543	3
渝薯198	4.6991	1.1485	0.1038	1.5098	-1.2475	-2.3078	-1.114	1.5819	1

2.9 聚类分析

根据甘薯淀粉品质指标测定结果,采用组间联接法进行系统聚类分析,以平方欧式距离为度量标准,对 10 个甘薯品种进行聚类分析,得到聚类谱系图(图 3)。当平方欧式距离为 15 时,可将 10 个甘薯品种分为五大类,其中黔薯 11、渝薯 15、徐薯 22 聚为第 I 类;齐宁 19、渝薯 198 和渝薯 50 聚为第 II 类;商薯 19 聚为第 III 类;鄂薯 6 号、苏薯 28 聚为第 IV 类;徐薯 37 为第 V 类。结合淀粉性质、粉条品质测定结果综合来看,第 I 类直链淀粉含量较高、淀粉糊化温度较高;第 II 类淀粉粗脂肪、灰分和磷含量较低,粉条的硬度和胶粘性较高;第 III 类直链淀粉含量较低,淀粉粒径较大,粉条干物质质量较高,弹性和咀嚼性较好,适宜作为粉条加工品种;第 IV 类粉条干物质的量较低,粉条硬度较低、胶粘性和咀嚼性较差;第 V 类淀粉粒径较小,粘度参数较低,粉条弹性和咀嚼性较差,所以第 IV 类和第 V 类不适宜用作粉条加工品种。

质进行测定和分析,结果表明 10 个品种之间淀粉品质存在差异性。通过指标间相关性分析,发现各指标之间有不同程度的相关性,存在信息重叠现象。采用主成分分析将指标进行简化,得到 10 个甘薯品种淀粉品质综合评分由高到低依次为:渝薯 198、商薯 19、渝薯 50、渝薯 15、齐宁 19、黔薯 11、徐薯 22、苏薯 28、徐薯 37、鄂薯 6 号。通过聚类分析将 10 个甘薯品种分为五类,其中第 III 类的商薯 19,淀粉粒径较大,回生值较高,粉条断条率较低,并且弹性较好,所以初步筛选出商薯 19 是适合加工粉条的品种;第 II 类的渝薯 198 综合得分最高,总淀粉和直链淀粉含量较高,粉条弹性和咀嚼性较好,但是烹煮损失较高,粉条硬度较大,因此不适宜用作粉条加工品种,可以考虑开发为其他淀粉食品;第 IV 类的鄂薯 6 号和苏薯 28,其粉条干物质的量较低,粉条硬度过低、胶粘性和咀嚼性较差,以及第 V 类的徐薯 37 淀粉粒径较小,粘度参数较低,粉条弹性和咀嚼性较差,不适宜用作粉条加工品种。本研究可为甘薯淀粉品质综合评价和优质甘薯粉条加工品种的选择运用提供参考。

© The Author(s) 2025. 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] 唐芬,赵路宽,苏一钧,等. 基于 InDel 标记分析 305 份中国甘薯登记品种遗传多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(4): 576-585. [TANG F, ZHAO L K, SU Y J, et al. Genetic diversity analysis of 305 registered sweetpotato varieties in China based on InDel markers[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(4): 576-585.]

[2] 联合国粮农组织的粮食和农业数据. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data>. [Food and agriculture data from the Food and Agri-culture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/fao-stat/zh/#data>.]

[3] ZHOU W Z, YANG J, HONG Y, et al. Impact of amylose content on starch physicochemical properties in transgenic sweet potato[J]. Carbohydrate. Polymers, 2015, 122: 417-427.

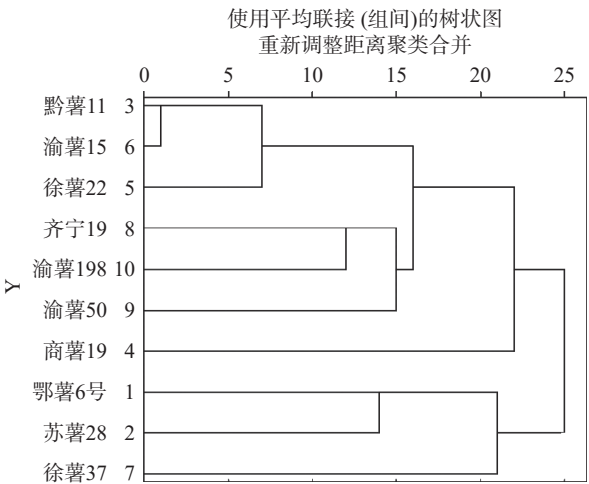


图 3 不同甘薯品种系统聚类谱系图

Fig.3 Cluster pedigree diagram of different sweet potato varieties

3 结论

本研究对 10 个淀粉型甘薯品种淀粉成分、淀粉颗粒形态和粒径、热力学特性、糊化特性及其粉条品

- [4] MOHAMMED O, BIN X. Review on the physicochemical properties, modifications, and applications of starches and its common modified forms used in noodle products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 112: 106286.
- [5] ZHANG Y Y, LI G P, WU Y W, et al. Influence of amylose on the pasting and gel texture properties of chestnut starch during thermal processing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 378–383.
- [6] YONG H M, WANG X C, SUN J, et al. Comparison of the structural characterization and physicochemical properties of starches from seven purple sweet potato varieties cultivated in China[J]. *International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions*, 2018, 120: 1632–1638.
- [7] LI Y B, ZHAO L X, SHI L Q, et al. Sizes, components, crystalline structure, and thermal properties of starches from sweet potato varieties originating from different countries[J]. *Molecules*, 2022, 27(6): 1905.
- [8] 唐忠厚, 朱晓倩, 李强, 等. 不同基因型甘薯直链淀粉含量差异研究[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(11): 108–110. [TANG Z H, ZHU X Q, LI Q, et al. Genotype variation in amylose content of sweetpotato[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(11): 108–110.]
- [9] 王建芳, 高山, 牟德华. 基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(13): 85–91. [WANG J F, GAO S, MU D H. Quality evaluation of different varieties of Oat Based on principal components analysis and cluster analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 85–91.]
- [10] 陈重远, 张大双, 张习春, 等. 基于主成分分析和聚类分析对籼稻资源品质性状的综合评价[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(24): 8330–8340. [CHEN Z Y, ZHANG D S, ZHANG X C, et al. Comprehensive evaluation of quality traits of indica rice resources based on PCA and CA[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(24): 8330–8340.]
- [11] 雷月, 宫彦龙, 邓茹月, 等. 基于主成分分析和聚类分析综合评价蒸谷米的品质特性[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(7): 258–267. [LEI Y, GONG Y L, DENG R Y, et al. Comprehensive evaluation of quality characteristics of parboiled rice based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(7): 258–267.]
- [12] WANG Q, LI X N, CHEN H W, et al. Mapping combined with principal component analysis identifies excellent lines with increased rice quality[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 59–69.
- [13] ZENG J, GAO H Y, LI G L, et al. Physicochemical properties of different corn varieties by principal components analysis and cluster analysis[J]. *Chemical Society of Pakistan*, 2013, 35(5): 1275–1278.
- [14] GUO K, LIU T X, XU A H, et al. Structural and functional properties of starches from root tubers of white, yellow, and purple sweet potatoes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 829–836.
- [15] 何洁, 闫飞燕, 黄芳, 等. 双波长法测定薯芋类农产品中直链淀粉和支链淀粉的含量[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 303–309. [HE J, YAN F Y, HUANG F, et al. Determination of amylose and amylopectin contents in Yam and Taros by Dual-Wavelength Spectrophotometry[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(7): 303–309.]
- [16] DENG F, LI Q P, CHEN H, et al. Relationship between chalkiness and the structural and thermal properties of rice starch after shading during grain-filling stage[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 252: 117–212.
- [17] GUO L. *In vitro* amylase hydrolysis of amylopectins from cereal starches based on molecular structure of amylopectins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 77: 238–247.
- [18] KONG X L, BAO J S, CORKE H. Physical properties of Amaranthus starch[J]. *Food Chemistry*, 2009, 113(2): 371–376.
- [19] 邹金浩, 李燕, 李文佳, 等. 淮山淀粉性质及其与粉条品质的相关性[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(8): 69–75. [ZOU J H, LI Y, LI W J, et al. Properties of Yam starches and its correlation with the qualities of starch noodles[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(8): 69–75.]
- [20] 石彬, 李咏富, 龙明秀, 等. 四种多糖代替明矾改善红薯粉的品质特性[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(9): 202–210. [SHI B, LI Y F, LONG M X, et al. Enhancing the quality of sweet potato powder with four polysaccharides instead of alum[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(9): 202–210.]
- [21] 张令文, 琚星, 李欣欣, 等. 8个品种甘薯淀粉的理化性质及其相关性分析[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 26–32. [ZHANG L W, JU X, LI X X, et al. Physicochemical properties and their correlation of starches from eight sweet potato cultivars[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(4): 26–32.]
- [22] ZHU F, YANG X S, CAI Y Z, et al. Physicochemical properties of sweetpotato starch[J]. *Starch-Stärke*, 2011, 63(5): 249–259.
- [23] 侯夫云, 陈桂玲, 董顺旭, 等. 不同品种甘薯淀粉组分、物化及粉条品质的比较研究[J]. *核农学报*, 2022, 36(2): 392–401. [HOU F Y, CHEN G L, DONG S X, et al. Comparative study on starch composition, physicochemistry and vermicelli quality of different varieties of sweet potato[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(2): 392–401.]
- [24] ABEGUNDE O K, MU T H, CHEN J W, et al. Physicochemical characterization of sweet potato starches popularly used in Chinese starch industry[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 33(2): 169–177.
- [25] 史春余, 姚海兰, 张立明, 等. 不同类型甘薯品种块根淀粉粒粒度的分布特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4537–4543. [SHI C Y, YAO H L, ZHANG L M, et al. Starch granule size distribution in storage roots of different types of sweetpotato cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21): 4537–4543.]
- [26] 徐家露. 不同糯稻品种的支链淀粉结构及其遗传基础研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021. [XU J L. Structural analysis and genetic basis of amylopectin in different glutinous rice varieties[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.]
- [27] 李艺博. 不同甘薯品种淀粉的理化特性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. [LI Y B. Physicochemical properties of starches from different sweetpotato varieties[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.]
- [28] HOOVER R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2001, 45(3): 253–267.
- [29] LIN L S, GUO D W, ZHAO L X, et al. Comparative structure of starches from high-amylose maize inbred lines and their hybrids[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 19–28.
- [30] COOKE D, GIDLEY M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: Origin of the enthalpic transition[J]. *Carbohydrate research*, 1992, 227: 103–112.

- [31] SHAR T, ZHONG H S, ALI U, et al. Mapping quantitative trait loci associated with starch paste viscosity attributes by using double haploid populations of rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(7): 1691–1703.
- [32] 孙健, 岳瑞雪, 钮福祥, 等. 淀粉型甘薯品种直链淀粉含量、糊化特性和乙醇发酵特性的关系[J]. *作物学报*, 2012, 38(3): 479–486. [SUN J, YUE R X, NIU F X, et al. Relationship among amylose content, starch pasting and ethanol fermentation in sweet-potato varieties for starch use[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(3): 479–486.]
- [33] 谭洪卓, 谭斌, 刘明, 等. 甘薯淀粉性质与其粉丝品质的关系[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 286–292. [TAN H Z, TAN B, LIU M, et al. Relationship between properties of sweet potato starch and qualities of sweet potato starch noodles[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4): 286–292.]
- [34] 李燕, 贺燕, 邹金浩, 等. 基于主成分和聚类分析的不同品种淮山淀粉品质评价[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(10): 223–230. [LI Y, HE Y, ZOU J H, et al. Quality evaluation of different cultivars of Yam starches based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(10): 223–230.]
- [35] 罗红霞, 王丽, 句荣辉, 等. 不同品种谷子淀粉的品质特性及主成分分析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(24): 11–17. [LUO H X, WANG L, JU R H, et al. Quality characteristics and principal component analysis of different varieties of millet starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(24): 11–17.]