

王宁宁, 彭春娥, 史磊, 等. 不同熟制方式影响紫薯感官品质的机制研究 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 37-44. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110247

WANG Ningning, PENG Chun'e, SHI Lei, et al. Mechanism of Different Cooking Methods Affecting Sensory Quality of Purple Sweet Potato[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 37-44. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110247

· 研究与探讨 ·

不同熟制方式影响紫薯感官品质的机制研究

王宁宁¹, 彭春娥², 史磊¹, 丁军¹, 许彤¹, 孙秀丽¹, 王庆彬^{1,*}

(1. 山东宇泰生物种业有限公司, 山东泰安 271000;

2. 山东省农业科学院, 农产品加工与营养研究所, 山东济南 250100)

摘要: 选取了泰紫薯 1 号、紫罗兰、越南小紫薯三种代表性鲜食紫薯品种为实验材料, 以普薯 32 为对照, 探究了烤制、蒸制、微波三种熟制方式处理后紫薯的感官评分、水分含量、淀粉含量、糖含量等指标。结合相关性分析和偏最小二乘回归法 (Partial Least Squares Regression, PLSR) 探究了消费者感官评价和理化指标之间的相关性关系。感官评价结果显示, 蒸泰紫薯 1 号得分最高, 甜度和质地是决定消费者喜好程度的驱动型属性; 熟制方式显著影响紫薯的理化品质, 熟制后紫薯水分和淀粉含量降低, 还原糖和总糖含量升高。蔗糖和麦芽糖在熟制后增加, 葡萄糖和果糖随品种和熟制方式呈现不同变化趋势。在熟制过程中, 蒸制有利于水分保持, 烤制最有利于高温糖化。相关性分析发现感官评价得分与水分、还原糖 (果糖、葡萄糖) 呈极显著正相关性 ($P < 0.01$), 与淀粉含量呈显著负相关性 ($P < 0.05$), 相关性大小依次为还原糖、淀粉、果糖、葡萄糖、水分。PLSR 确定了影响紫薯感官品质的主要指标为还原糖、果糖、葡萄糖。本研究为建立紫薯感官预测模型、开发不同紫薯品种最佳加工工艺、指导鲜食型紫薯的选育提供一定的科学依据。

关键词: 紫薯, 熟制方式, 感官品质, 相关性分析, 偏最小二乘回归分析 (PLSR)

中图分类号: TS215

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)21-0037-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110247



本文网刊:

Mechanism of Different Cooking Methods Affecting Sensory Quality of Purple Sweet Potato

WANG Ningning¹, PENG Chun'e², SHI Lei¹, DING Jun¹, XU Tong¹, SUN Xiuli¹, WANG Qingbin^{1,*}

(1. Shandong Yutai Biological Seed Co., Ltd., Taian 271000, China;

2. Institute of Agro-Product Processing and Nutrition, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: Three representative purple fleshed sweet potato varieties, Taizishu NO.1, Violet and Vietnamese purple sweet potato were selected as materials. Sensory evaluation, moisture content, starch content, sugar content were explored after baking, steaming and microwave with Pushu NO.32 as the control. Combining with correlation analysis and partial least squares regression (PLSR), the correlations of consumer sensory evaluation and physicochemical property were explored. The sensory evaluation results showed that, Taizishu No.1 obtained the highest score. The sweetness and texture were the driving attributes which could determine consumer preference. The cooking method significantly affected the sensory quality of purple sweet potato. Moisture and starch content of purple sweet potato were decreased after cooking while content of reducing sugar and total sugar were increased. Moreover, sucrose and maltose content increased, while glucose and fructose showed different changes with different varieties and cooking methods. Steaming facilitated water retention and roasting was good for high temperature saccharification during ripening. The correlation analysis showed that the sensory evaluation score was significantly positively correlated with water content and reducing sugar (fructose and glucose) ($P < 0.01$), and negatively correlated with starch content ($P < 0.05$). The effect of water, glucose, fructose, starch and

收稿日期: 2022-11-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (32101035)。

作者简介: 王宁宁 (1996-), 女, 硕士, 初级工程师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: wangnn1111@163.com。

* 通信作者: 王庆彬 (1989-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: wangqingbin1203@163.com。

reducing sugar on sensory evaluation score increased gradually. PLSR indicated that main indicators affecting sensory quality of purple sweet potato were reducing sugar, fructose and glucose. This study could provide a scientific basis for establishing sensory prediction model of purple sweet potato, develop the best processing technology of different varieties of purple sweet potato, and guide the breeding of fresh purple sweet potato.

Key words: purple sweet potato; cooking methods; sensory quality; correlation analysis; partial least squares regression (PLSR)

甘薯(*Ipomoea batatas* (L.) Lam), 俗称红薯、地瓜、番薯等, 是旋花科一年生或多年生草本植物^[1]。甘薯块根既是储藏养分的器官, 又是营养繁殖的器官, 富含淀粉、蛋白质、多种纤维素和矿物质等^[2]。根据块根的不同用途, 甘薯可以分为鲜食型、淀粉型和加工型, 根据肉色的不同分为白肉甘薯、黄肉甘薯、紫肉甘薯等^[3]。对于鲜食型品种而言, 色香味俱佳、感官品质个性化突出的品种稀少, 能够进行特色化发展的品种不多^[4], 将甘薯育种计划重点转移到消费者喜欢的性状上, 已经被证明是一个有价值的策略^[5-6], 紫薯富含花青素、多糖、膳食纤维等营养成分, 符合人们对健康功能食品追求的潮流, 越来越引起国内外学者的关注。然而, 对于紫薯的研究多集中在其功能物质花青素的生物活性、分离提取以及再加工利用上^[7], 鲜有在感官方面的研究报道。

不同的熟制方式对熟紫薯品质的影响不同, 蒸制、烤制、微波是甘薯常用的烹饪方法^[8-9]。Nicoletto 等^[10]发现蒸制后甘薯的麦芽糖、咖啡酸和绿原酸浓度增加最为显著, 微波对甘薯品质的影响不显著; Tsai 等^[11]确定了甘薯最佳烘烤时间和主要风味物质。Wei 等^[12]发现蒸煮降低了淀粉含量, 提高了还原糖含量, 特别是麦芽糖含量, 但对非还原糖含量无显著影响, 烘焙对淀粉减少效果最小。上述研究主要集中在黄肉甘薯研究中, 对紫薯研究甚少, 尤其是品种、熟制方式、理化指标变化与紫薯感官评价之间的关系不清晰, 主要影响因素不明确, 缺乏相应的评价模型方法体系。

紫薯感官品质是一个复杂的多因素互作综合体系, 仅通过单项指标不能直观、准确地评价紫薯感官品质。偏最小二乘回归分析(Partial Least Squares Regression, PLSR)能够揭示理化特性与感官属性的关系, 预测感官属性的变化^[13], 是一种多元统计分析方法。本文以三个紫薯品种为实验组, 以普薯 32 号为阳性对照, 选取蒸制、烤制和微波三种熟制方式进行加工, 通过测定甘薯水分、淀粉、糖等理化指标及感官评价, 结合 PLSR 和相关性分析研究紫薯理化特性和感官评价的相关性, 确定影响紫薯感官品质的主要因素和不同紫薯的最佳熟制方式, 建立紫薯感官预测模型, 为紫薯感官品质的优化和选种育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

四个甘薯品种分别为泰紫薯 1 号(山东宇泰生

物种业有限公司提供), 紫罗兰、越南小紫薯、普薯 32 号(网络购买, 产地均为广西); D-(-)-果糖、D-(+)-葡萄糖、D-(+)-蔗糖 东京化成工业株式会社(TCI); D-(+)-麦芽糖 坛墨质检-标准物质中心; 总糖测定试剂盒 北京索莱宝科技有限公司; 其他试剂均为国产分析纯。

XH-68 电地瓜炉 徐州旭弘食品机械有限公司; M1-211A 微波炉、C21-Simple101 电磁炉 美的集团有限公司; 101-2A 电热鼓风干燥箱 天津市通利信达仪器厂; BSA124S 电子天平 赛多利斯科学仪器有限公司; Synergy H1 全功能酶标仪 美国伯腾仪器有限公司; RID-20A 液相色谱仪 日本岛津。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制作 选择中等大小、无虫眼、重量和表型相近的新鲜中果紫薯。分别制作成鲜样、熟样、冻干粉样品。具体制作方式为: 鲜样是将新鲜紫薯切块后搅碎成泥; 烤制是将整个紫薯置于烤箱中 250 ℃ 烤制 30 min, 再 160 ℃ 烤制 30 min, 烤后去皮; 蒸制是将整个紫薯放于蒸锅中, 水沸后蒸制 40 min, 熟后去皮; 微波是将整个紫薯置于 700 W 微波炉中高火烤制 20 min。冻干粉是将鲜薯和熟薯分别切成约 0.5 cm 厚的紫薯片, 在-80 ℃ 冰箱预冻后, 置于冻干机中真空冷冻干燥 72 h 至恒重, 取出粉碎, 过 100 目筛。采用四分法取样^[14], 储存于-20 ℃ 备用。

1.2.2 感官评价 集中和家庭感官评价参考 Chan 等^[15]方法略有改动。集中感官评定小组由 6 男 6 女组成, 分别将烤制、蒸制、微波样品切成约 1 cm 厚的薄片于盘中, 使用三位数字随机编号, 由感官小组成员盲评, 感官评价标准(表 1)中项目各权重为: 外观 15%、香味 10%、甜度 40%、质地 20%、纤维感 15%, 根据权重计算加权总分作为总分, 总分=外观×15%+香味×10%+甜度×40%+质地×20%+纤维感×15%。评定过程中, 成员不得交流, 组与组之间使用清水漱口。家庭感官实验包括 16 组家庭, 共计 34 名实验对象, 提前进行甘薯品质特点、感官评价方法、感官品质描述方法培训, 将熟制好的样品带回家品尝, 按照喜好进行感官描述和排名, 统计样品正面评价比例及描述, 进行绘图。

1.2.3 水分含量测定 参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[16]。

1.2.4 淀粉含量测定 参考陈鹰等^[17]使用酸水解-二硝基水杨酸法(DNS)法测定。分别称取鲜薯和熟制

表 1 甘薯感官评分标准
Table 1 Sweet potato sensory scoring criteria

评价项目	评价标准	评分
外观	颜色鲜亮, 呈深紫色或橘红色, 均匀, 无次色, 诱人	7~10
	颜色较鲜亮, 呈紫色或黄色, 色泽较均匀, 无次色, 较诱人	4~6
	颜色不鲜亮, 浅紫色或浅黄色, 色泽不均匀, 次色明显, 不诱人	1~3
香味	薯香味浓烈稳定, 无异味	7~10
	薯香味较淡, 气息较短	4~6
	无明显薯香味, 或有异味(酸涩味)	1~3
甜度	甜味浓明显, 有回味感	7~10
	有淡淡甜味, 后味较短	4~6
	甜味不明显, 寡淡无味	1~3
质地	肉质软糯粘滑, 无粉感, 有黏齿感	7~10
	肉质较为软糯而粘, 粉感弱, 黏齿感稍小	4~6
	肉质糯性差且偏硬, 粉且较干, 薯肉松散	1~3
纤维感	无咀嚼粗糙感, 无残留纤维	7~10
	有一定咀嚼粗糙感, 残留纤维较少	4~6
	咀嚼粗糙感明显, 残留纤维较多	1~3

紫薯冻干样各 1.00 g 于两个 50 mL 离心管中, 加入 85% 的乙醇 8 mL, 50 ℃ 水浴保温 30 min 后取出快速冷却至室温, 4000 r/min 离心 5 min, 弃上清, 沉淀重复清洗 3 次。向沉淀中加入 10 mL 6 mol/L HCL 和 14 mL 蒸馏水, 振荡混匀。水解完全后取出冷却至室温, 过滤去杂, 使用 40% NaOH 中和滤液。取 0.25 mL 淀粉提取液加入 1.75 mL 蒸馏水和 1.5 mL DNS 试剂, 沸水浴 5 min, 冷却后定容至 25 mL, 混匀, 540 nm 测定吸光值。

1.2.5 还原糖测定 参考闵燕萍等^[18]使用 DNS 法测定。将鲜样和熟样搅碎成泥, 每种样品准确称取 1.00 g 于研钵中, 加入少量蒸馏水, 研磨匀浆后分别转入 25 mL 刻度试管中, 冲洗研钵, 定容至 25 mL。80 ℃ 保温 30 min。5000 r/min 离心 5 min, 取上清, 滤渣洗涤两次, 上清液集中在 100 mL 容量瓶中定容, 待测。取 2 mL 还原糖提取液加入 1.5 mL DNS 试剂, 沸水浴 5 min, 冷却后定容至 25 mL, 混匀, 540 nm 测定吸光值。

1.2.6 总糖测定 使用试剂盒测定, 利用酸水解法, 在碱性条件下 DNS 与还原糖被还原成氨基化合物, 在 540 nm 测定吸光值。

1.2.7 可溶性糖测定 参考 Tsai 等^[11]使用高效液相色谱法并略有改动。将鲜样和熟样搅碎成泥, 每种样品称取紫薯泥样品 10 g 低温研磨成匀浆, 分别加入 30 mL 蒸馏水在 60 ℃ 下超声提取 30 min, 重复提取 3 次后定容至 100 mL, 离心过滤。使用示差检测器, 色谱柱为 YMC-Pack Polyamine II(250 mm×4.6 mm, I.D.S-5 μm, 12 nm), 流动相为乙腈:水=75:25, 流速为 1 mL/min, 柱温 35 ℃, 进样体积 20 μL。

1.3 数据处理

以上实验测定重复三次, 数据使用 SPSS 25 进行方差分析, 使用 The Scrambler 10.4 进行偏最小二

乘回归分析, 使用 Origin 2019 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 紫薯集中和家庭感官评价分析

对不同熟制方式处理的不同品种紫薯进行感官评价, 最终得分雷达图如图 1 所示。感官总分前三名依次为蒸泰紫薯 1 号、烤普薯 32 号、烤泰紫薯 1 号。外观和香味得分最高的分别为烤泰紫薯 1 号、烤普薯 32 号, 均为烤制处理, 原因是在烘烤过程中, 甘薯发生美拉德反应从而产生了大量挥发性化合物, 因此获得更好的风味和色泽^[9,19]。甜度得分最高的是烤普薯 32 号。质地得分最高的是蒸泰紫薯 1 号, 肉质软糯粘滑无粉感, 而得分最低的微波越南小紫薯则干面、粉感明显, 这与较高的淀粉含量有关^[20]。纤维感得分最高和最低的分别是烤普薯 32 号、微波紫罗兰, 这与品种和熟制方式有关。根据感官评价, 泰紫薯 1 号、紫罗兰、越南小紫薯、普薯 32 号最佳熟制方式分别为蒸制、烤制、蒸制、烤制。三种熟制方式下越南小紫薯的感官评价得分均较低, 因此在后续的家庭感官试验中去除越南小紫薯。

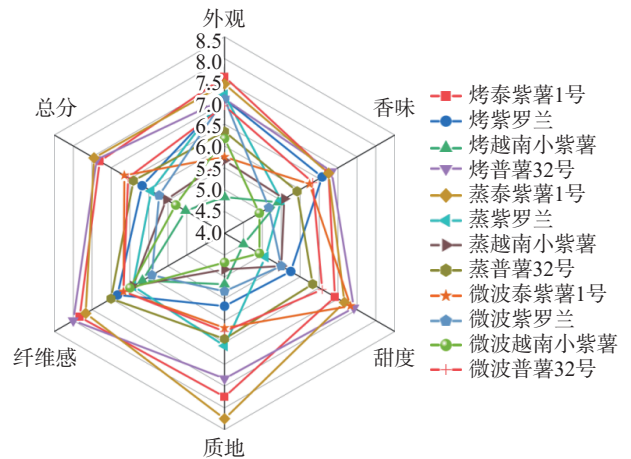


图 1 紫薯的集中感官评价得分雷达图
Fig.1 Radar chart of concentrated sensory evaluation score of purple sweet potato

为了解消费者对不同紫薯的关键喜好属性, 进行了家庭感官实验, 在家庭环境下对不同样品进行感官情感描述^[21](图 2)。蒸泰紫薯 1 号的正面评价最多, 有 69.23% 的受试者作出了味甜、水分足、软糯、色泽好、好吃、味香等描述, 有 30.77% 的受试者作出了无香味、有点噎人、略干的评价。由情绪分析可以得到, 甜度高、水分充足、软糯、颜色鲜亮、香气浓郁等是消费者普遍喜好的感官特征, 味道和质地是决定感官评价中喜好程度的驱动型属性^[22]。因此进一步测定可能影响味道和质地的理化指标。

2.2 不同熟制方式处理的紫薯基本指标分析

不同熟制处理的紫薯水分、淀粉以及糖含量结果如表 2 所示。熟制后紫薯的水分含量降低, 这与人前结果一致^[23]。蒸制对水分含量的影响最小, 原因可能是加热过程中水蒸气有利于紫薯水分的保持, 而

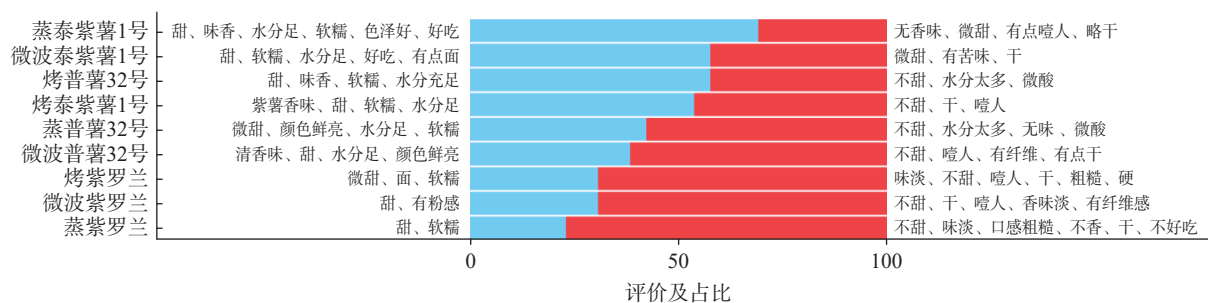


图2 家庭感官实验中偏好驱动因素的情绪分析

Fig.2 Emotional analysis of preference drivers in family sensory experiment

表2 不同熟制方式的紫薯水分、淀粉、还原糖及总糖含量

Table 2 Moisture, starch, reducing sugar and total sugar content of purple sweet potato in different cooking methods

处理方式	品种	水分含量(%)	淀粉含量(%)	还原糖(%)	总糖(%)
鲜薯	泰紫薯1号	73.10±0.21 ^{Aa}	35.99±1.06 ^{Ab}	5.63±0.29 ^{Da}	22.82±0.98 ^{Cb}
	紫罗兰	67.20±0.56 ^{Ad}	47.28±2.26 ^{Aa}	5.37±0.60 ^{Ca}	31.52±1.36 ^{Aa}
	越南小紫薯	68.70±0.30 ^{Ac}	45.85±1.77 ^{Aa}	5.20±0.36 ^{Ca}	25.94±2.05 ^{Bb}
	普薯32号	70.10±0.55 ^{Ab}	41.12±1.64 ^{Aa}	5.62±0.46 ^{Ca}	25.12±2.48 ^{Bb}
烤制	泰紫薯1号	66.22±0.25 ^{Ca}	32.57±1.69 ^{BCab}	9.97±0.42 ^{Aa}	30.91±1.85 ^{Aa}
	紫罗兰	62.42±0.20 ^{Bb}	28.89±1.27 ^{BCb}	8.37±0.61 ^{Ab}	28.05±2.91 ^{Aa}
	越南小紫薯	59.81±0.19 ^{Cc}	33.99±0.29 ^{Ba}	7.58±0.33 ^{Ab}	27.40±2.55 ^{Ba}
	普薯32号	58.01±0.15 ^{Cc}	22.65±0.98 ^{Cc}	10.88±0.71 ^{Aa}	30.68±1.85 ^{Ba}
蒸制	泰紫薯1号	72.01±0.28 ^{Aa}	23.52±0.97 ^{Db}	7.50±0.25 ^{Bb}	23.91±2.58 ^{Ca}
	紫罗兰	67.35±0.28 ^{Ab}	27.03±0.39 ^{Ca}	7.37±0.37 ^{Bbc}	28.52±2.25 ^{Aa}
	越南小紫薯	65.77±0.14 ^{Bc}	26.13±0.53 ^{Ca}	6.88±0.10 ^{ABc}	28.68±2.02 ^{Ba}
	普薯32号	66.75±0.25 ^{Bb}	18.63±0.80 ^{Dc}	8.55±0.03 ^{Ba}	27.89±2.58 ^{Ba}
微波	泰紫薯1号	70.12±0.59 ^{Ba}	27.65±0.41 ^{Cb}	6.68±0.26 ^{Cb}	26.71±0.84 ^{Bc}
	紫罗兰	63.29±0.17 ^{Bb}	32.03±1.51 ^{Bb}	6.98±0.05 ^{Bb}	30.66±0.85 ^{Ab}
	越南小紫薯	55.83±0.51 ^{Dc}	39.09±0.27 ^{Ba}	6.49±0.07 ^{Bb}	32.91±2.13 ^{Aab}
	普薯32号	55.53±0.47 ^{Dc}	30.87±1.51 ^{Bb}	9.42±0.38 ^{Ba}	34.70±0.46 ^{Aa}

注:不同大写字母代表同种品种不同处理间差异显著($P<0.05$);不同小写字母代表相同处理不同品种间差异显著($P<0.05$),图4同。

进行烤制和微波时,紫薯暴露在高温环境下,水分流失严重^[24]。鲜薯的水分含量由高到低依次为泰紫薯1号>普薯32号>越南小紫薯>紫罗兰,在熟制后,泰紫薯1号水分含量均高于其他三个品种,保持了较高的水分含量。

熟制后紫薯淀粉含量显著降低($P<0.05$),原因是在熟制过程中,淀粉在淀粉酶的作用下转化为还原糖^[25]。鲜薯淀粉含量从高到低依次为紫罗兰>越南小紫薯>普薯32号>泰紫薯1号。在所有熟制方式中,蒸制对淀粉含量影响最大,原因可能是蒸制时,热量从外层逐渐向内部传递,因此 β -淀粉酶活力充分释放,将淀粉分解为还原糖^[26]。在所有品种中,普薯32号的淀粉含量下降幅度最大,越南小紫薯在熟制后表现出了高淀粉含量,这与感官评价中质地得分一致。

所有品种鲜薯还原糖含量均高于5.20%,品种间无显著差异($P>0.05$),熟制后还原糖含量显著增加($P<0.05$),但是造成淀粉下降最显著的熟制方式,并未使还原糖上升最显著,这说明淀粉分解与还原糖增

加并非一一对应。有研究表明,熟制后的还原糖一部分来自于鲜薯还原糖,一部分来自熟制过程中淀粉的分解,因此除了淀粉酶外还有其他影响还原糖含量的因素^[27]。鲜薯还原糖从高到低依次为泰紫薯1号>普薯32号>紫罗兰>越南小紫薯。烤制、蒸制、微波后还原糖含量最高的品种均为普薯32号。

除了还原糖外,还进行了总糖含量测定,以探究其与甜度的关系。鲜薯总糖含量从高到底依次为紫罗兰>越南小紫薯>普薯32号>泰紫薯1号,结合还原糖数据可推测,紫罗兰和越南小紫薯非还原性糖含量较高。紫薯中还原糖主要含有葡萄糖、果糖、麦芽糖,非还原糖主要含有蔗糖、低聚糖和糊精,可溶性糖包括葡萄糖、果糖、麦芽糖和蔗糖^[28],为进一步探究不同糖对甘薯感官甜度的贡献,进行了可溶性糖的测定。

2.3 不同熟制方式处理前后紫薯可溶性糖变化

可溶性糖标准品的色谱图和回归方程如图3和表3所示。不同品种紫薯熟制后可溶性糖总量的变化如图4所示。鲜薯中可溶性糖总量从高到低依次

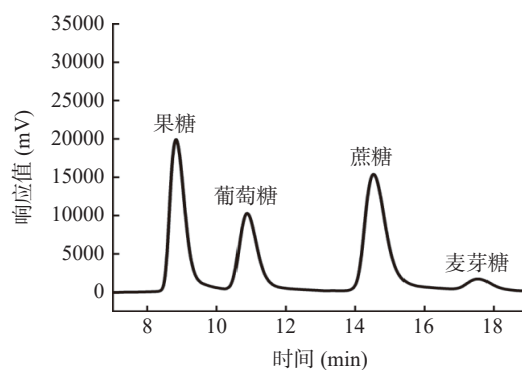


图3 可溶性糖标准品代表性色谱图

Fig.3 Representative chromatogram of soluble sugar standards

表3 可溶性糖标准品的回归方程和相关系数

Table 3 Regression equation and correlation coefficient of soluble sugar standards

可溶性糖	回归方程	相关系数
果糖	$y=119285x+19.9$	0.9998
葡萄糖	$y=80046x+213.4$	0.9990
蔗糖	$y=117064x+6281.7$	0.9997
麦芽糖	$y=63225x+96.15$	0.9992

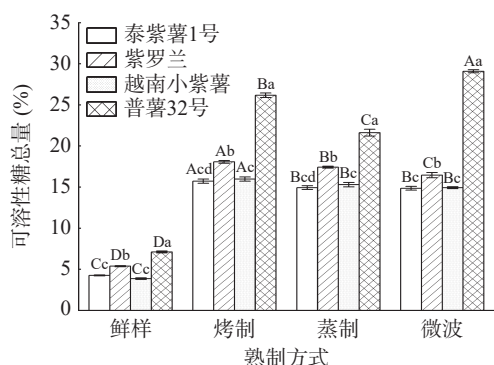


图 4 不同品种、不同熟制方式紫薯的可溶性糖总量

Fig.4 Total soluble sugar of purple sweet potato with different varieties and different cooking methods

为普薯 32 号>紫罗兰>泰紫薯 1 号>越南小紫薯,对泰紫薯 1 号、紫罗兰、越南小紫薯可溶性糖含量影响最大的方式为烤制,对普薯 32 号影响最大的方式为微波。熟制后,可溶性糖总量从高到低依次为普薯 32 号>紫罗兰>越南小紫薯>泰紫薯 1 号。可溶性糖包含还原糖,若将可溶性多糖定义为除了还原糖之外的可溶性糖,结合还原糖结果,推测熟制后紫罗兰和越南小紫薯的可溶性多糖增加较多。

可溶性糖含量如图 5 所示,鲜薯的可溶性糖以蔗糖为主,平均占总可溶性糖的 63.23%。麦芽糖主要在熟制后大量增加,成为熟薯可溶性糖的主要部分,平均占总可溶性糖的 67.83%,这与前人研究结果一致^[12,28-29]。泰紫薯 1 号、越南小紫薯、普薯 32 号在熟制后果糖和葡萄糖含量降低,蔗糖和麦芽糖含量增加。紫罗兰在微波、烤制后四种可溶性糖含量均表现增加趋势,蒸制后果糖、葡萄糖含量降低。总体来说,果糖和葡萄糖受熟制方式的影响弱于蔗糖和麦芽糖,为了明确影响感官甜度的主要糖类,本文进行了相关性分析。

2.4 相关性分析

由感官情绪描述可知,水分、甜度、质地是消费者关注的感官指标。根据各指标相关性(表 4)可知,水分与淀粉含量呈现极显著的负相关性($P<0.01$),与还原糖含量、果糖和葡萄糖含量呈现极显著正相关性($P<0.01$)。在甘薯品质评价中,通常以鲜薯可溶性总糖含量作为甜度评价的主要指标,但对于此并无定论。有研究表明鲜薯可溶性糖含量与食味无关或仅有极其微弱的正相关性^[30-31],也有研究表明鲜薯可溶性糖与产品甜度呈显著或极显著的正相关性,与烘烤食味总评呈显著正相关性^[32]。在本研究中,感官甜度与鲜薯可溶性糖相关性大于熟薯可溶性糖,与还原糖(果糖、葡萄糖)呈现极显著相关性($P<0.01$)。此外,甜度还与水分呈现极显著正相关性($P<0.01$),与淀粉呈现极显著负相关性($P<0.01$)。质地与水分、还原糖(果糖、葡萄糖)呈现极显著正相关关系($P<0.01$),与淀粉含量呈现极显著负相关性($P<0.01$),有研究表明,糖对于熟制后软糯细腻的质地同样有良好贡献^[33]。

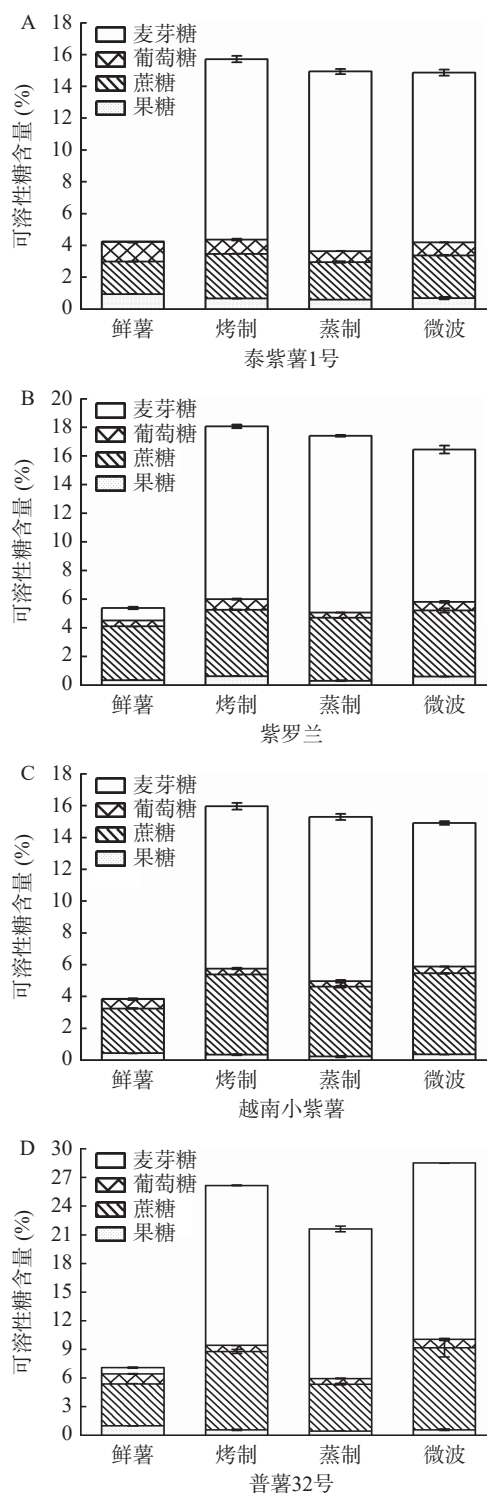


图 5 不同品种、不同熟制方式紫薯的可溶性糖含量

Fig.5 Soluble sugar of purple sweet potato with different varieties and different cooking methods

2.5 紫薯理化指标和感官评价间的 PLSR 分析

以水分含量、淀粉、还原糖、总糖、果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖为自变量(X),以感官评价各指标为因变量(Y)进行偏最小二乘回归分析,图 6 为载荷图。位于同一象限内,距离越近的样本之间相关性越强^[34],图中内椭圆代表 $R^2=0.5$,外椭圆代表 $R^2=1$,所有样本点均落在两个椭圆内说明模型具有预测能力^[35]。果糖、水分含量与各感官评价指标同在第一

表 4 紫薯指标间相关性分析
Table 4 Correlation analysis of sweet potato indexes

	鲜薯								熟薯								感官评价				
	水分	淀粉	还原糖	果糖	葡萄糖	麦芽糖	蔗糖	可溶性糖	水分	淀粉	还原糖	果糖	葡萄糖	麦芽糖	蔗糖	可溶性糖	外观	香味	甜度	质地	纤维感
鲜薯	淀粉	-0.986**																			
	还原糖	0.719**	-0.823**																		
	果糖	0.837**	-0.891**	0.892**																	
	葡萄糖	0.955**	-0.976**	0.842**	0.962**																
	麦芽糖	-0.583**	0.442**	0.142	-0.187	-0.396*															
	蔗糖	-0.571**	0.453**	0.074	-0.033	-0.303	0.849**														
	可溶性糖	-0.141	-0.005	0.523**	0.405*	0.149	0.762**	0.887**													
熟薯	水分	0.438**	-0.443**	0.336*	0.179	0.314	-0.172	-0.477**	-0.273												
	淀粉	-0.333*	0.396*	-0.517**	-0.371*	-0.366*	-0.150	0.003	-0.224	-0.813**											
	还原糖	0.253	-0.341*	0.584**	0.576**	0.440**	0.282	0.409*	0.628**	-0.251	-0.088										
	果糖	0.531**	-0.608**	0.723**	0.536**	0.554**	0.119	-0.101	0.231	0.162	-0.147	0.407*									
	葡萄糖	0.602**	-0.679**	0.787**	0.657**	0.656**	0.078	-0.063	0.301	0.089	-0.127	0.493**	0.909**								
	麦芽糖	0.184	-0.249	0.454**	0.638**	0.441**	0.180	0.576**	0.734**	-0.413*	-0.043	0.665**	0.048	0.245							
	蔗糖	-0.363*	0.298	0.022	0.110	-0.120	0.467**	0.791**	0.705**	-0.789**	0.357*	0.510**	-0.084	0.001	0.759**						
感官评价	可溶性糖	-0.059	0.052	0.451**	0.461*	0.222	0.544*	0.792**	0.899**	-0.512**	0.033	0.704**	0.191	0.311*	0.895**	0.875**					
	外观	0.096	-0.173	0.388*	0.168	0.137	0.345*	0.137	0.275	0.152	-0.225	0.317	0.363*	0.385*	0.005	0.013	0.184				
	香味	0.418*	-0.467**	0.527**	0.470**	0.463**	0.024	-0.032	0.214	0.205	-0.329*	0.437**	0.462**	0.533**	0.255	0.010	0.250	0.642**			
	甜度	0.563**	-0.615**	0.658**	0.626**	0.620**	-0.035	-0.064	0.251	0.265	-0.395*	0.357*	0.531**	0.568**	0.288	0.015	0.249	0.485**	0.738**		
	质地	0.558**	-0.619**	0.683**	0.581**	0.593**	0.019	-0.104	0.220	0.409*	-0.494**	0.433**	0.477**	0.493**	0.195	-0.132	0.176	0.609**	0.738**	0.696**	
	纤维感	0.415*	-0.442**	0.441**	0.455**	0.454**	-0.082	-0.066	0.152	0.168	-0.306	0.417*	0.312	0.352*	0.236	0.008	0.170	0.607**	0.780**	0.676**	0.781**
	总评	0.539**	-0.601**	0.678**	0.599**	0.593**	0.031	-0.049	0.268	0.304	-0.434**	0.439**	0.533**	0.572**	0.253	-0.021	0.247	0.701**	0.863**	0.924**	0.879**

注: *代表差异显著 ($P<0.05$); **代表差异极显著 ($P<0.01$)。

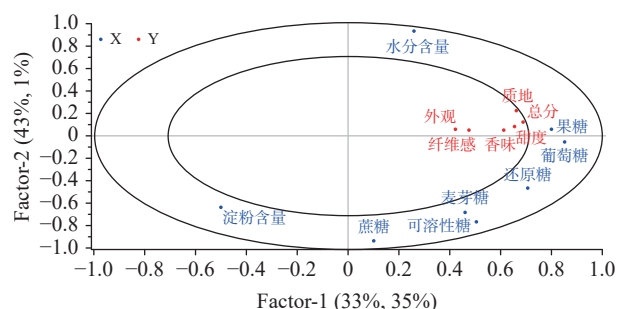


图 6 紫薯化学指标与感官评价间的 PLSR 载荷图

Fig.6 PLSR plot of chemical indices and sensory evaluation of purple sweet potato

象限,果糖、葡萄糖、还原糖与感官指标的距离较近,说明与感官品质有较大相关性。淀粉含量与感官指标距离较远,与感官指标呈现负相关性,这与相关性分析结果一致。感官指标中,甜度和质地距离总分最近,说明这两个指标是与总分相关性最大的指标,而外观是与总分相关性最弱的指标,这与相关性分析结果一致。

3 结论

对不同熟制方式处理的不同紫薯的感官评分、水分、淀粉、糖含量进行了测定,由感官实验可知,甜度高、水分充足、软糯、香气浓郁是消费者喜爱的特征,感官得分最高和最低的处理分别为蒸泰紫薯 1 号和烤越南小紫薯,总分分别为 7.45 和 5.03。由理化指标测定得出,熟制后水分和淀粉含量显著下降($P<0.05$),总糖和还原糖含量显著上升($P<0.05$),蒸制对水分影响最小,对淀粉影响最大,烤制对还原糖影响最大,而微波对还原糖的影响最小。蔗糖和麦芽糖在熟制后呈上升趋势,果糖和葡萄糖受熟制方式和品种的影响呈现不同的变化趋势。PLSR 结合相关性分析得出,感官评价与水分、还原糖(果糖、葡萄糖)呈极显著正相关关系($P<0.01$),与淀粉呈极显著负相关关系($P<0.01$)。与熟薯相比,感官总分与鲜薯可溶性糖的正相关性更大。综上,通过相关性分析结合 PLSR 分析法,可以建立甘薯感官预测模型,筛选可以鉴定感官品质的指标。水分、还原糖(果糖、葡萄糖)、淀粉是探究甘薯感官品质的重要指标。根据感官评价总分,确定不同品质紫薯的最佳熟制方式,泰紫薯 1 号和越南小紫薯最适合蒸制,紫罗兰和普薯 32 号最适合烤制。

参考文献

[1] BOVELL-BENJAMIN A C. Sweet potato: A review of its past, present, and future role in human nutrition[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2007, 52: 1–59.
[2] WANG S N, NIE S P, ZHU F. Chemical constituents and health effects of sweet potato[J]. *Food Research International*, 2016, 89(1): 90–116.
[3] 李佳欣. 甘薯抗褐变种质资源筛选及转录组测序分析[D]. 重庆: 西南大学, 2022. [LI Jiaxin. Screening and transcriptomic sequencing of *Germplasm* resources resistant to browning in sweet potato[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.]

[4] 易中懿, 汪翔, 徐雪高, 等. 品种创新与甘薯产业发展[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(6): 1401–1409. [YI Zhongyi, WANG Xiang, XU Xuegao, et al. Variety innovation and sweet potato industry development[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 34(6): 1401–1409.]
[5] BAAFI E, MANU A J, GRACEN V E, et al. Development of end-user preferred sweetpotato varieties[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2016, 8(2): 57.
[6] LADO J, VICENTE E, MOLTINI A, et al. Integrating consumer perception in the selection of purple-skin sweet potato cultivars[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(9): 3620–3629.
[7] BRIDGERS E N, CHINN M S, TRUONG V D. Extraction of anthocyanins from industrial purple-fleshed sweet potatoes and enzymatic hydrolysis of residues for fermentable sugars[J]. *Industrial Crops & Products*, 2010, 32(3): 613–620.
[8] MWANGA R O M, MAYANJA S, SWANCKAERT J, et al. Development of a food product profile for boiled and steamed sweet potato in Uganda for effective breeding[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 56(3): 1385–1398.
[9] SOCHINWECHI N, DILIP N R R. Texture profile analysis of organic sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivars as affected by different thermal processing methods[J]. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 2019(2): 93–100.
[10] NICOLETTO C, VIANELLO F S P. Effect of different home-cooking methods on textural and nutritional properties of sweet potato genotypes grown in temperate climate conditions[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(2): 574–581.
[11] TSAI Y J, LIN L Y, YANG K M, et al. Effects of roasting sweet potato (*Ipomoea batatas* L. Lam.): Quality, volatile compound composition[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2602.
[12] WEI S Y, LU G Q, CAO H P. Effects of cooking methods on starch and sugar composition of sweet potato storage roots[J]. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0182604.
[13] 王洪伟, 索化夷, 张玉, 等. 感官评价和 GC-MS 结合偏最小二乘回归法分析酚类化合物对腊肉烟熏风味的贡献[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(21): 244–249. [WANG Hongwei, SUO Huayi, ZHANG Yu, et al. Contribution of phenolic compounds to smoked flavor of cured meat by sensory evaluation and Partial least squares regression method combined with GC-MS[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(21): 244–249.]
[14] 陈玉胜, 王伯荪. 中点四分法取样技术在热带山地雨林中的应用[J]. *生态科学*, 1994(1): 56–62. [CHEN Yusheng, WANG Bosun. Application of sampling technique of midpoint quarter method in tropical mountain rainforest[J]. *Ecological Science*, 1994(1): 56–62.]
[15] CHAN C F, CHIANG C M, LAI Y C, et al. Changes in sugar composition during baking and their effects on sensory attributes of baked sweet potatoes[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(12): 4072–4077.
[16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1–2. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of China. GB 5009.3-2016 Determination of moisture in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1–2.]
[17] 陈鹰, 乐俊明, 丁映. 酸水解-DNS 法测定马铃薯中淀粉含量[J]. *种子*, 2009, 28(9): 109–110. [CHEN Ying, LE Junming, DING Ying. Determination of starch content in potato by acid hy-

- drololysis and DNS[J]. Seed, 2009, 28(9): 109-110.]
- [18] 闵燕萍, 刘乐宁, 赵国华. 不同加工方式下红薯中还原糖的动态变化研究[J]. 粮油加工, 2008(4): 107-109. [MIN Yanping, LIU Lening, ZHAO Guohua. Study on dynamic change of reducing sugar in sweet potato under different processing methods[J]. Grain & Oil Processing, 2008(4): 107-109.]
- [19] XIAO L, LEE J, ZHANG G, et al. HS-SPME GC/MS characterization of volatiles in raw and dry-roasted almonds (*Prunus dulcis*) [J]. Food Chemistry, 2014, 151, 31-39.
- [20] 黄华宏, 陆国权, 郑遗凡. 不同生育期甘薯块根淀粉糊化特性的差异[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 462-467. [HUANG Huahong, LU Guoquan, ZHENG Yifan. Differences in gelatinization characteristics of sweet potato root at different growth stages [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(3): 462-467.]
- [21] MOYO M, NAMANDA S, et al. Consumer preference testing of boiled sweet potato using crowd sourced citizen science in Ghana and Uganda[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021, 5: 17.
- [22] KOLAWOLE F L, BALOGUM M, SAMSON A O, et al. Production and sensory evaluation of Kunun-zaki sweetened with orange fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas*) syrup[J]. Croatian Journal of Food Science and Technology, 2018, 10(2): 239-244.
- [23] 赵楠, 邓浩, 赵建国, 等. 不同方式熟化甘薯的试验研究[J]. 农产品加工, 2019(15): 8-10, 14. [ZHAO Nan, DENG Hao, ZHAO Jianguo, et al. Experimental study on different curing methods of sweet potato[J]. Agricultural Products Processing, 2019(15): 8-10, 14.]
- [24] 林燕, 霍艳荣, 吕尊富, 等. 基于主成分分析法的甘薯熟化品质评价[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 1-7, 16. [LIN Yan, HUO Yanrong, LÜ Zunfu, et al. Maturation quality evaluation of sweet potato based on principal component analysis[J]. Food Research and Development, 2021, 42(11): 1-7, 16.]
- [25] BABU L. Change of carbohydrate of sweet potato storage roots during processing[J]. Trop Agric, 1994, 71(1): 71-73.
- [26] PURWADI R, LESTARI D, LOHOO C A, et al. The effect of size and solid content in hydrolysis of sweet potato starch using endogenous beta-amylase enzyme[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1143(1): 012043.
- [27] 叶夏芳, 胡琼之, 邱天越, 等. 不同品种和加工方式对甘薯糖化特性的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(7): 141-149. [YE Xiafang, HU Qiongzhi, QIU Tianyue, et al. Effects of different varieties and processing methods on saccharification characteristics of sweet potato[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(7): 141-149.]
- [28] PICHA D H. HPLC determination of sugars in raw and baked sweet potatoes[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(4): 1189-1210.
- [29] 沈升法, 项超, 吴列洪, 等. 甘薯块根可溶性糖组分特征及其与食味的关联分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1): 34-45. [SHEN Shengfa, XIANG Chao, WU Liehong, et al. Analysis of soluble sugar components in sweet potato root and its association with taste[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(1): 34-45.]
- [30] HOU F N, MU T H, MA M M, et al. Sensory evaluation of roasted sweet potatoes influenced by different cultivars: A correlation study with respect to sugars, amino acids, volatile compounds, and colors[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14646.
- [31] 黄洁, 甘学德, 许瑞丽, 等. 21份紫肉甘薯资源的营养品质及其产量评价[J]. 福建农业学报, 2011, 26(2): 215-222. [HUANG Jie, GAN Xuede, XU Ruili, et al. Nutritional quality and yield evaluation of 21 purple sweet potato resources[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 26(2): 215-222.]
- [32] 陆国权. 紫心甘薯的理化品质及其加工适应性研究[J]. 中国粮油学报, 2000, 15(1): 45-49. [LU Guoquan. Study on physicochemical quality and processing adaptability of Zixin sweet potato [J]. China Journal of Grain and Oils, 2000, 15(1): 45-49.]
- [33] 沈升法, 吴列洪, 李兵. 紫肉甘薯部分营养成分与食味的关联分析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 555-564. [SHEN Shengfa, WU Liehong, LI Bing. Correlation analysis of some nutrients and eating taste of purple sweet potato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(3): 555-564.]
- [34] ZHUANG J D, XIAO Q, FENG T, et al. Comparative flavor profile analysis of four different varieties of Boletus mushrooms by instrumental and sensory techniques[J]. Food Research International, 2020, 136: 109485.
- [35] XIAO Z B, LI Q, NIU Y W, et al. Odor-active compounds of different lavender essential oils and their correlation with sensory attributes[J]. Industrial Crops & Products, 2017, 108: 748-755.