

西南地区淀粉加工型甘薯的淀粉性状对 粉丝蒸煮品质的影响

潘雪萍¹, 莫罗杭¹, 徐锡明¹, 傅玉凡², 张治国³, 吴卫成³, 路兴花¹, 庞林江¹, 陆国权^{1*}

(1. 浙江农林大学 薯类作物研究所, 现代农学院, 食品与健康学院(现代粮食产业学院), 浙江省农产品品质改良重点实验室, 浙江 杭州 311300; 2. 西南大学 生命科学学院, 重庆市甘薯工程技术研究中心, 重庆 400715; 3. 浙江省农业科学院 食品科学研究所, 浙江 杭州 310022)

摘要: 为探究西南地区淀粉加工型甘薯淀粉与其粉丝蒸煮品质之间的关系, 从甘薯的淀粉组成、物化特性以及粉丝蒸煮品质指标进行测定, 并进行相关性和主成分分析。结果表明: 甘薯粉丝的蒸煮品质受淀粉糊化特性影响最大; 结晶度与粉丝膨润度呈极显著正相关($P<0.01$), 粗蛋白含量与粉丝膨润度呈显著负相关($P<0.05$); 谷值黏度、崩解值、峰值时间、成糊温度和总磷含量与粉丝断条率显著相关($P<0.05$); 成糊温度与粉丝煮沸损失呈极显著正相关($P<0.01$); 甘薯粉丝加工时, 可以以糊化特性、结晶度、粗蛋白含量、总磷含量为参考依据, 选择合适甘薯品种以提高其粉丝蒸煮品质; 主成分分析得到3个主成分, 累计贡献率为87.894%, 并建立综合评价数学函数: $F=0.465 7F_1+0.302 2F_2+0.232 1F_3$ 。

关键词: 甘薯; 淀粉; 组成; 物化特性; 粉丝蒸煮品质

Effect of Starch Properties of Starch-processed Sweet Potato on the Cooking Quality of Vermicelli in Southwest China

PAN Xueping¹, MO Luohang¹, XU Ximing¹, FU Yufan², ZHANG Zhiguo³, WU Weicheng³, LU Xinghua¹, PANG Linjiang¹, LU Guoquan^{1*}

(1. Institute of Root and Tuber Crops, College of Advanced Agricultural Sciences, College of Food and Health (Modern Food Industry College), The Key Laboratory for Quality Improvement of Agricultural Products of Zhejiang Province, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. School of Life Sciences, Chongqing Sweetpotato Engineering and Technology Research Center, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310022, Zhejiang, China)

Abstract: In order to explore the relationship between different varieties of starch-processed sweet potato and their vermicelli cooking quality, the starch composition, physicochemical properties and vermicelli cooking quality indicators of sweet potato were determined, and correlation analysis and principal component analysis were carried out. The results showed that the cooking quality of sweet potato vermicelli was most affected by the gelatinization characteristics of starch. The crystallinity showed a very significantly positive correlation with the vermicelli swelling degree ($P<0.01$), and the crude protein content showed a significantly negative correlation with the vermicelli swelling degree ($P<0.05$). The trough viscosity, breakdown viscosity, peak time, gelatinization temperature and total phosphorus content were significantly correlated with the vermicelli breaking rate ($P<0.05$). The gelatinization temperature showed a very significantly positive correlation with the boiling loss of vermicelli ($P<0.01$). When processing sweet potato vermicelli, suitable sweet potato varieties can be selected with gelatinization characteristics, crystallinity, crude protein content and total phosphorus content as the references to improve the cooking quality of vermicelli. Three principal components were obtained by prin-

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2022SNJF008); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-10-GW21); 浙江省重点研发计划项目(2022C02041-2); 浙江省教育厅科研资助项目(Y202147184)

作者简介: 潘雪萍(1999—), 女(汉), 硕士, 研究方向: 农产品贮藏与加工。

*通信作者: 陆国权(1963—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 薯类作物品质评价及产后商品化。

principal component analysis, with a cumulative contribution rate of 87.894 4%, and a comprehensive evaluation function was established: $F=0.465 7F_1+0.302 2F_2+0.232 1F_3$.

Key words: sweet potato; starch; composition; physicochemical properties; cooking quality of vermicelli

引文格式:

潘雪萍,莫罗杭,徐锡明,等.西南地区淀粉加工型甘薯的淀粉性状对粉丝蒸煮品质的影响[J].食品研究与开发,2024,45(10):7-13.

PAN Xueping, MO Luohang, XU Ximing, et al. Effect of Starch Properties of Starch-processed Sweet Potato on the Cooking Quality of Vermicelli in Southwest China[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 7-13.

粉丝,又称线粉、粉条,是我国传统的淀粉类食品,具有柔韧、爽口、润滑等特点,深受消费者的喜爱^[1]。粉丝加工的原料选择较多,有豆类淀粉、薯类淀粉和谷物淀粉等。豆类淀粉是制作粉丝的良好原料,相比于薯类淀粉和谷物淀粉,豆类淀粉具有较高的直链淀粉含量和较强的回生能力,使得品质优于谷物淀粉和薯类淀粉^[2]。然而豆类淀粉较其它淀粉价格昂贵且产量低,无法满足粉丝加工市场消费需求。

我国淀粉加工型甘薯品种资源丰富,其支链淀粉含量高,有独特的高黏性,所制粉丝筋道、耐煮、透明度高^[3],且甘薯淀粉所制的粉丝品质显著优于木薯淀粉、玉米淀粉和小麦淀粉制备的粉丝^[4]。不同品种的甘薯淀粉性质存在较大差异^[5],如淀粉的理化指标、热力学特性等,都会对分析产生不同的影响^[6],因此,所生产的粉丝品质也具有很大差异。淀粉理化性质以及分子结构对粉丝品质具有较大影响。粉丝原料可依据淀粉的直链淀粉含量、淀粉结构、凝胶强度、成糊温度、回生值进行评价,其中直链淀粉含量高、膨润度低、成糊温度低、长期回生明显的粉丝其品质较好^[6-7]。

迄今为止,关于甘薯淀粉理化特性与粉丝加工品质的相关性研究虽已有报道,但选取的物化特性与粉丝品质指标较少,代表性不够强,且已有的几个研究结果有差异,难以全面且准确地反映甘薯淀粉理化特性对其粉丝加工品质的影响。因此,本研究选用西南地区具有代表性的淀粉加工型品种‘商薯 19’、‘渝薯 1’、‘渝薯 17’和‘渝薯 27’作为试验材料,全面分析 4 种甘薯的淀粉组成、物化特性的品种间差异,并对这些特性与粉丝加工品质之间的关系进行相关性研究,探究影响甘薯粉丝蒸煮品质的重要因素,以期构建粉丝加工型甘薯体系补充相关理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

供试甘薯(‘商薯 19’、‘渝薯 1’、‘渝薯 17’、‘渝薯 27’):重庆市甘薯工程技术研究中心试验基地。

1.2 仪器与设备

NIRSystem5000 近红外反射光谱分析仪:丹麦 Foss 公司;NR110 便携式色差仪:深圳市三恩时科技有限公司;Malvern Mastersizer 3000 激光粒度分析仪:英国 Malvern 仪器公司;D8 Advance 型 X-射线衍射仪:德国 Bruker AXS 公司;3-D 型快速淀粉黏度分析仪:澳大利亚 Newport Scientific 公司;JYN-L6 面条机:九江股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 甘薯淀粉的制备

参考陆国权^[8]的方法提取淀粉,于 45 °C 干燥后备用。

1.3.2 甘薯淀粉基本组成的测定

利用近红外光谱法测定淀粉基本组成(支链淀粉含量、表观直链淀粉含量、粗蛋白含量和总磷含量)^[9]。通过近红外反射光谱分析仪上建立测定方程对各个品种甘薯淀粉组成实现快速检测,根据实验室前期结果,测定精准度达到了 99.98%。

1.3.3 甘薯淀粉白度的测定

淀粉白度用色差仪测定,分别测定每个品种甘薯淀粉的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值,重复 3 次,仪器校准使用白色参考瓷板进行。白度指数表示淀粉白度,其值越大,淀粉越白,计算公式如下^[10]。

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

式中: W 为白度指数; L^* 为亮度值; a^* 为红度值; b^* 为黄度值。

1.3.4 甘薯淀粉颗粒粒径的测定

甘薯淀粉颗粒粒径的测定采用激光粒度分析仪,测试粒径范围为 0.01~3 500 μm ,采取湿法分散法,以水为分散剂,取少许测试样品即甘薯淀粉与分散剂在样品槽中,超声波分散后,利用激光光散射原理,用 10% 以上的遮光度对样品进行测量,每个样品重复 3 次。

1.3.5 甘薯淀粉结晶度的测定

参考 Zhang 等^[11]的方法进行测定,使用 X-射线衍

射仪对淀粉颗粒进行分析,将淀粉样品装入玻璃样品架中,并以 0.05° 的步长在 $3^\circ\sim 40^\circ$ 的 2θ 角范围内收集数据。

1.3.6 甘薯淀粉老化度的测定

参考杜秀杰^[12]的方法进行测定,将质量分数为3%的淀粉乳置于沸水浴中加热20 min,边加热边调糊,使浓度维持稳定。再称取一定质量的糊置于 4°C 冰箱内,24 h后取出,3 000 r/min离心15 min,离心后分离出的水质量为 M_1 ,称取的淀粉糊质量为 M_2 ,两者的比值即为甘薯淀粉的老化度($O, \%$),计算公式如下。

$$O = M_1/M_2 \times 100 \quad (2)$$

1.3.7 甘薯淀粉糊化特性的测定

参考Liu等^[13]的方法并稍作修改,使用快速淀粉黏度分析仪(rapid viscosity analyzer, RVA)研究甘薯淀粉的糊化特性:甘薯淀粉样品过100目筛后于 50°C 下烘3 h,使其含水量控制在14%。准确称取3.000 g样品于测定杯中,加25.00 mL蒸馏水,小型塑料螺旋浆预搅1 min,拌成糊状后,卡入RVA旋转塔测定。测定过程中,搅拌器开始10 s内的转速为960 r/min,将小铝筒内淀粉悬浮液搅匀,随后保持在160 r/min。罐内温度变化参数为 50°C 下保持1 min,接着以 $12.0^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 95°C ,达到最高温度 95°C 后,保持2.5 min,然后以 $12.0^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度降温,终止温度为 50°C 。

1.3.8 甘薯淀粉膨胀势的测定

参考Rani等^[14]的方法进行测定。将1.00 g样品(W_1)与49 mL蒸馏水混合,并在 90°C 下水浴加热1 h,将悬浮液快速冷却并在8 000 r/min下离心10 min。然后将上清液干燥(105°C)至恒重后测定干物质的质量(W_2)。膨胀势(S)计算公式如下。

$$S = W_2/W_1 \quad (3)$$

1.3.9 粉丝的制备

参考廖卢艳等^[15]的方法稍作修改,取9.0 g淀粉样品加60 mL水在沸水中糊化,再加入75.0 g淀粉和适量的水分别调制成总含水率为45%的淀粉粉团,将粉团倒入面条机挤压至装有沸水锅中煮30 s,随后迅速置于冷水中1 min后立即捞出。 4°C 存放4 h后 50°C 干燥备用。

1.3.10 粉丝蒸煮品质的测定

粉丝蒸煮品质指标参考陆国权^[8]的方法进行,采用断条率、膨润度、煮沸损失来衡量,测定方法如下。

断条率:取长度为10 cm的粉丝20根,在500 mL蒸馏水中煮沸30 min,计算断条数 W ,最后以断条率计。

膨润度、煮沸损失:取样品5 g于 105°C 烘箱干燥4 h,测定质量 W_1 ,然后在100 mL沸腾的去离子水中加热15 min,迅速冷却,用吸水纸吸去粉丝表面的附着水,测定含水物质质量 W_2 ,再以 105°C 干燥4 h,测定

干物质质量 W_3 。

煮沸损失($B, \%$)、膨润度($P, \text{g/g}$)、断条率($N, \%$)计算公式分别如公式(4)~公式(6)所示。

$$B = \frac{W_1 - W_3}{W_1} \times 100 \quad (4)$$

$$P = W_2/W_3 \quad (5)$$

$$N = (W/20) \times 100 \quad (6)$$

1.4 数据处理

数据处理采用Excel 2016和SPSS 19,进行单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)和Pearson相关性分析,各指标均重复测定3次。

2 结果与讨论

2.1 不同品种甘薯淀粉的组成分析

直链淀粉和支链淀粉是甘薯淀粉的主要组成部分。甘薯的品种类型、栽培和储藏环境及淀粉制备方法均会造成其淀粉原料的性质差异^[16-17]。不同品种甘薯淀粉组成见表1。

表1 不同品种甘薯淀粉组成

Table 1 The components of starches from different varieties of sweet potato

品种	支链淀粉含量/%	表观直链淀粉含量/%	粗蛋白含量/%	总磷含量/%
‘商薯19’	59.93±0.13 ^b	22.90±0.15 ^a	0.23±0.05 ^a	2.04±0.48 ^{ab}
‘渝薯1’	63.03±2.11 ^a	20.40±2.22 ^a	0.28±0.05 ^a	1.89±0.63 ^b
‘渝薯17’	63.46±1.75 ^a	20.52±1.28 ^a	0.27±0.05 ^a	2.09±0.21 ^{ab}
‘渝薯27’	64.03±1.44 ^a	21.17±2.84 ^a	0.28±0.08 ^a	2.63±0.12 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表1可知,4个甘薯品种的支链淀粉含量在59.93%~64.03%,渝薯系列3个品种的支链淀粉含量均与‘商薯19’有显著差异($P<0.05$)。4个甘薯品种的表观直链淀粉含量介于20.40%~22.90%,粗蛋白含量在0.23%~0.28%,均没有显著差异($P>0.05$),甘薯表观直链淀粉含量与已有研究一致^[18],且淀粉中直链淀粉含量越高,淀粉凝胶强度越高,所制粉丝品质越好^[19-20]。‘渝薯1’和‘渝薯27’粗蛋白含量一致且最高,‘商薯19’粗蛋白含量相对较低。总磷含量介于1.89%~2.63%,‘渝薯1’和‘渝薯27’品种间差异显著($P<0.05$),‘渝薯17’和‘商薯19’总磷含量较为接近。

2.2 不同品种甘薯淀粉的白度分析

白度是成品淀粉外观的重要指标,也是划分淀粉等级的重要理化指标之一,直接影响消费者的接受程度^[21]。在淀粉的生产研究中,会经常需要测定淀粉白度。

不同品种甘薯淀粉白度如表2所示。

由表2可知,‘渝薯1’的 L^* 值显著小于其它3个品种($P<0.05$)。4个品种的 a^* 值、 b^* 值间无显著差异

表2 不同品种甘薯淀粉白度

Table 2 The white index of starches from different varieties of sweet potato

品种	L*值	a*值	b*值	W
‘商薯 19’	78.46±0.74 ^a	-1.21±0.22 ^a	17.04±0.30 ^a	72.50±0.68 ^a
‘渝薯 1’	75.37±1.65 ^b	-1.05±0.31 ^a	17.72±1.01 ^a	69.63±1.94 ^b
‘渝薯 17’	77.83±0.42 ^a	-1.05±0.07 ^a	16.83±0.09 ^a	72.14±0.28 ^a
‘渝薯 27’	77.63±0.98 ^a	-1.05±0.08 ^a	16.83±0.42 ^a	71.98±1.00 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

($P>0.05$)。W 值的大小受 L* 值的影响较大,因此‘渝薯 1’的 W 值显著小于其它 3 个品种($P<0.05$),白度从高到低依次为‘商薯 19’、‘渝薯 17’、‘渝薯 27’、‘渝薯 1’。褐变是导致不同品种甘薯白度不一的重要原因,甘薯细胞遭到破坏,其中的酚类物质会在多酚氧化酶作用下氧化形成醌,醌与其它物质反应生成黑色或褐色的沉淀,从而降低淀粉的白度^[22],而‘商薯 19’和‘渝薯 17’正好是褐变指数相对较低的品种^[23]。

2.3 不同品种甘薯淀粉的颗粒粒径分析

淀粉颗粒的形态和大小会影响其食品加工过程中的理化性质^[24]。Dx(10)表示粒径小于该值的淀粉颗粒占 10%,Dx(50)为中位粒径,表示粒径小于该值的淀粉颗粒占 50%,Dx(90)表示粒径小于该值的淀粉颗粒占 90%。4 个品种甘薯淀粉颗粒粒径如表 3 所示。

表3 不同品种甘薯淀粉颗粒粒径

Table 3 The particle size of starches from different varieties of sweet potato

品种	μm		
	Dx(10)	Dx(50)	Dx(90)
‘商薯 19’	11.45±1.63 ^a	28.71±0.44 ^a	81.87±1.47 ^b
‘渝薯 1’	10.82±0.67 ^a	22.13±1.56 ^b	72.88±8.21 ^b
‘渝薯 17’	11.17±0.71 ^a	24.97±2.44 ^b	113.71±5.69 ^a
‘渝薯 27’	11.98±0.27 ^a	24.33±0.50 ^b	53.99±2.63 ^c

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 3 可知,中位粒径在 22.13~28.71 μm ,4 个品种的 Dx(10)之间无显著差异($P>0.05$),说明 4 种淀粉的 Dx(10)大小颗粒具有相似的颗粒特性。‘商薯 19’Dx(50)的颗粒粒径显著大于其它 3 个品种($P<0.05$),

其中‘渝薯 1’的颗粒最小,为 22.13 μm 。‘商薯 19’、‘渝薯 1’与‘渝薯 17’和‘渝薯 27’的 Dx(90)皆存在显著差异($P<0.05$),‘渝薯 17’的 Dx(90)颗粒粒径大于另外 3 个品种。本试验甘薯淀粉粒径与文献^[25]报道的颗粒粒径大小存在较大差别,可能是由于其制备淀粉时匀浆时间较长,研磨更为充分。

2.4 不同品种甘薯淀粉的老化度、膨胀势、结晶度分析

4 个甘薯品种淀粉的老化度、膨胀势、结晶度分析如表 4 所示。

表4 不同品种甘薯淀粉老化度、膨胀势、结晶度

Table 4 The retrogradation degree, swelling power and crystallinity of starches from different varieties of sweet potato

品种	老化度/%	膨胀势/(g/g)	结晶度/%
‘商薯 19’	31.22±6.69 ^a	30.60±0.64 ^a	50.50±0.85 ^a
‘渝薯 1’	31.29±3.68 ^a	26.30±1.27 ^c	48.71±0.90 ^a
‘渝薯 17’	31.26±6.59 ^a	29.21±2.21 ^{ab}	48.82±1.67 ^a
‘渝薯 27’	31.81±1.14 ^a	27.49±0.96 ^{bc}	49.61±1.45 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 4 可知,4 个品种甘薯淀粉的老化度变化范围为 31.22%~31.81%,其中‘商薯 19’老化度最低,‘渝薯 27’老化度最高,但品种间差异不显著($P>0.05$)。‘商薯 19’的膨胀势最大,其次是‘渝薯 17’、‘渝薯 27’、‘渝薯 1’,其中‘商薯 19’的膨胀势显著高于‘渝薯 1’和‘渝薯 27’($P<0.05$),4 个品种淀粉膨胀势的变化范围为 26.30~30.60 g/g。结晶度介于 48.71%~50.50%,品种间差异不显著($P>0.05$),其中‘商薯 19’的淀粉结晶度最高,‘渝薯 1’和‘渝薯 17’甘薯淀粉的结晶度较低。淀粉结晶区主要为排列紧密的支链淀粉结构,结晶度低则直链淀粉含量高^[26],4 个品种甘薯淀粉的结晶度大小与本试验所测直链淀粉含量结果排序一致。

2.5 不同品种甘薯淀粉的糊化特性分析

淀粉的糊化特性是影响粉丝品质的重要原因,因为面条由面筋蛋白提供骨架基础,而淀粉基食品需要依靠淀粉糊化和回生所形成的凝胶作为结构支撑^[27]。4 个品种甘薯淀粉的糊化特性指标见表 5。

表5 不同品种甘薯淀粉糊化特性

Table 5 The pasting properties of starches from different varieties of sweet potato

品种	最高黏度/cP	谷值黏度/cP	崩解值/cP	终值黏度/cP	回生值/cP	峰值时间/min	成糊温度/°C
‘商薯 19’	4 808.20±258.12 ^a	2 669.80±269.50 ^a	2 138.40±418.30 ^a	3 456.80±205.26 ^a	787.00±75.42 ^b	4.56±0.29 ^a	78.33±3.29 ^a
‘渝薯 1’	4 804.50±340.96 ^a	2 605.50±260.30 ^a	2 199.00±256.19 ^a	3 602.50±270.86 ^a	997.00±43.78 ^a	4.54±0.09 ^a	78.53±2.00 ^a
‘渝薯 17’	4 677.33±312.85 ^a	2 627.50±613.08 ^a	2 041.75±513.74 ^a	3 491.25±601.56 ^a	863.75±26.03 ^b	4.58±0.55 ^a	77.08±3.49 ^a
‘渝薯 27’	4 842.67±281.27 ^a	2 552.33±385.20 ^a	2 290.33±258.14 ^a	3 354.00±330.80 ^a	801.67±90.54 ^b	4.48±0.08 ^a	77.37±3.32 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 5 可知,除回生值外,品种间淀粉的糊化特性值均无显著差异($P>0.05$)。崩解值为最高黏度和谷值

黏度的差值,表示淀粉糊的稳定性,4 个品种淀粉中,‘渝薯 27’的最高黏度最大、谷值黏度最小。回生值为

终值黏度和谷值黏度的差值,表示淀粉糊的回生特性,‘渝薯1’的回生值显著大于其它3个品种,表示其回生程度最大,热稳定性较差。4个品种淀粉的成糊温度在77.08~78.53℃,‘渝薯1’的成糊温度最高。

2.6 不同品种甘薯粉丝的蒸煮品质分析

蒸煮品质是衡量粉丝品质的重要指标,4个品种甘薯粉丝蒸煮品质如表6所示。

表6 不同品种甘薯粉丝蒸煮品质指标

Table 6 The cooking quality of vermicelli from different varieties of sweet potato

品种	膨润度/(g/g)	煮沸损失/%	断条率/%
‘商薯19’	4.15±0.11 ^a	6.80±0.05 ^{ab}	6.63±0.25 ^b
‘渝薯1’	3.57±0.12 ^b	6.53±0.35 ^{ab}	6.95±0.17 ^b
‘渝薯17’	4.03±0.49 ^{ab}	6.18±0.50 ^b	10.93±0.01 ^a
‘渝薯27’	3.75±0.18 ^{ab}	6.98±0.38 ^a	6.00±0.41 ^c

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表6可知,‘商薯19’的膨润度最大,表明其粉丝的持水力较强,粉丝品质好^[28],其次是‘渝薯17’、‘渝薯27’、‘渝薯1’最低,‘商薯19’和‘渝薯1’粉丝膨润度存在显著差异($P<0.05$)。煮沸损失最大的是‘渝薯27’,其次是‘商薯19’、‘渝薯1’、‘渝薯17’最低。‘渝薯17’粉丝的断条率最高,且显著高于‘渝薯1’、‘商薯19’、‘渝薯27’($P<0.05$)。

2.7 不同品种甘薯淀粉组成、物化特性及粉丝蒸煮品质的相关性分析

研究表明,淀粉的颜色、颗粒粒径、糊化特性等与淀粉的物化特性及其食品的蒸煮品质密切相关^[19-20,24,27,29]。因此,可通过分析甘薯淀粉的组成和物化特性与甘薯粉丝蒸煮品质之间的相关性来预测粉丝的品质。采用Pearson相关性分析4个甘薯品种淀粉组成、物化性质以及其粉丝蒸煮品质指标之间的相关性,结果如表7所示。

由表7可知,淀粉结晶度与粉丝膨润度呈极显著正相关($P<0.01$),成糊温度与粉丝煮沸损失呈极显著正相关($P<0.01$),谷值黏度、崩解值、峰值时间、成糊温度都与粉丝断条率显著相关($P<0.05$),终值黏度与粉丝断条率呈极显著正相关($P<0.01$)。粉丝蒸煮品质受糊化特性影响较大,因为甘薯中支链淀粉占比较高,且成糊温度受支链淀粉含量影响,使得粉丝具有较好的黏结性和成膜特性^[30]。

粗蛋白含量与粉丝膨润度显著负相关($P<0.05$),淀粉中的蛋白质可用于提高其结构的黏弹性,改善淀粉基食品和粉丝的结构和口感^[31]。总磷含量与粉丝断条率之间显著负相关($P<0.05$),磷在改善淀粉凝胶强度的同时可以降低淀粉的成胶温度,并且增加淀粉的透明度^[32]。与已有研究结果相反^[6-7],表观直链淀粉含量、支链淀粉含量与粉丝蒸煮品质影响皆不显

表7 甘薯淀粉组成、物化性质与粉丝蒸煮品质的相关性分析
Table 7 The correlation analysis of the vermicelli cooking quality with the components and physicochemical properties of sweet potato starch

项目	膨润度	煮沸损失	断条率
支链淀粉含量	-0.241	-0.055	-0.343
表观直链淀粉含量	0.270	0.069	0.151
粗蛋白含量	-0.587 [*]	-0.320	0.446
总磷含量	-0.058	0.169	-0.519 [*]
L*值	-0.110	0.139	-0.510
a*值	0.103	0.468	-0.047
b*值	-0.180	-0.182	-0.211
W	0.342	0.121	0.262
Dx(10)	-0.017	0.010	-0.223
Dx(50)	-0.117	-0.380	-0.023
Dx(90)	-0.090	-0.199	0.365
老化度	-0.003	0.408	-0.379
膨胀势	-0.246	-0.223	-0.366
结晶度	0.757 ^{**}	0.347	-0.384
最高黏度	0.122	-0.441	0.066
谷值黏度	-0.119	-0.44	0.574 [*]
崩解值	0.220	0.115	-0.551 [*]
终值黏度	-0.171	-0.395	0.620 ^{**}
回生值	-0.153	0.227	0.056
峰值时间	0.181	0.207	0.458 [*]
成糊温度	0.397	0.599 ^{**}	-0.518 [*]
膨润度	1.000	0.455	-0.082
煮沸损失	0.455	1.000	-0.278
断条率	-0.082	-0.278	1.000

注:*表示在置信度为0.05时,相关性显著;**在置信度为0.01时,相关性极显著。

著($P>0.05$),可能是这几个品种间直链淀粉、支链淀粉含量无显著差异($P>0.05$)导致。

2.8 不同品种甘薯淀粉组成、物化特性及粉丝蒸煮品质的主成分分析

对甘薯淀粉及粉丝各指标进行主成分分析,结果如表8、表9所示。

表8 3个主成分的特征值、贡献率及累计贡献率
Table 8 Eigenvalues, contribution rates and cumulative contribution rates of three principal components

主成分编号	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	9.005 7	40.935 0	40.935 0
2	5.843 4	26.560 8	67.495 8
3	4.487 7	20.398 6	87.894 4

由表8可知,24个指标提取出3个主成分,前3个主成分的特征值分别为9.005 7、5.843 4和4.487 7,累计贡献率为87.894 4%,能够代表甘薯淀粉组成、物化特性和粉丝蒸煮品质的绝大部分信息。因此,选取前3个主成分作为重要主成分。根据指标的特征向量(表9)绝对值大小可知,决定主成分1大小的指标依次是

表9 3个指标的特征向量

Table 9 Eigenvectors of three principal components

指标	主成分1	主成分2	主成分3
支链淀粉含量	0.167 1	-0.201 2	-0.268 9
表观直链淀粉含量	-0.127 5	0.288 2	0.278 4
粗蛋白含量	-0.245 3	-0.165 7	0.254 9
总磷含量	0.318 5	0.001 4	-0.138 8
L*值	0.238 4	0.223 1	0.197 4
a*值	0.128 6	-0.307 3	-0.030 4
b*值	-0.311 8	0.016 1	-0.159 5
W	0.128 1	0.154 0	0.302 3
Dx(10)	0.262 7	0.175 6	0.198 1
Dx(50)	-0.026 6	0.378 0	-0.185 5
Dx(90)	0.119 1	-0.276 1	-0.031 1
老化度	0.115 5	-0.043 2	0.380 1
膨胀势	0.143 3	-0.370 8	0.042 9
结晶度	0.206 1	0.083 2	0.337 9
最高黏度	0.111 1	0.368 4	-0.146 1
谷值黏度	-0.228 0	0.250 1	-0.091 9
崩解值	-0.314 7	0.102 3	0.102 1
终值黏度	0.181 0	0.166 4	-0.271 0
回生值	-0.324 5	0.043 9	0.074 4
峰值时间	-0.283 3	-0.120 4	-0.014 8
成糊温度	-0.155 8	-0.006 1	-0.254 8
粉丝膨润度	0.202 5	0.178 2	-0.299 7
煮沸损失	0.167 1	-0.201 2	-0.268 9
断条率	-0.127 5	0.288 2	0.278 4

回生值>总磷含量>崩解值>b*值>峰值时间>Dx(10)>L*值;决定主成分2大小的指标依次是Dx(50)>膨胀势>最高黏度>a*值>断条率>表观直链淀粉含量>Dx(90)>谷值黏度,决定主成分3大小的指标依次是老化度>结晶度>W>粉丝膨润度>终值黏度>煮沸损失>支链淀粉含量>粗蛋白含量>成糊温度。

根据主成分的指标,得出3个线性关系代替原来的指标: $F_1 = 0.1617X_1 - 0.1275X_2 - 0.2453X_3 + \dots + 0.1671X_{23} - 0.1275X_{24}$; $F_2 = -0.2012X_1 + 0.2882X_2 - 0.1657X_3 + \dots - 0.2012X_{23} + 0.2882X_{24}$; $F_3 = 0.2689X_1 + 0.2784X_2 + 0.2549X_3 + \dots - 0.2689X_{23} + 0.2784X_{24}$ 。

3个线性关系从不同方面反映粉丝蒸煮品质,单独使用某一个均不能对粉丝进行综合评价,因此以每个线性关系的贡献率作为权重,对3个线性关系进行权重加和,建立综合评价数学函数 $F = 0.4657F_1 + 0.3022F_2 + 0.2321F_3$ 。计算各甘薯粉丝的综合得分可反映不同品种甘薯粉丝的综合品质,结果见表10。

表10 主成分得分

Table 10 Principal component scores

品种	F_1	F_2	F_3	F
‘商薯19’	2.228 2	-1.329 8	-2.741 2	0.738 7
‘渝薯1’	-5.219 1	-0.672 9	-0.646 5	-0.000 4
‘渝薯17’	1.017 8	-2.232 2	3.061 7	-2.783 9
‘渝薯27’	1.633 5	0.219 8	-0.380 9	0.510 0

由表10可知,‘商薯19’甘薯粉丝的综合品质得分最高,‘渝薯17’甘薯粉丝的综合品质得分最低,故‘商薯19’甘薯品种更适合制作甘薯粉丝。

3 结论

本试验分析西南地区具有代表性甘薯淀粉的组成、物化特性及其粉丝蒸煮品质,分析淀粉性状对粉丝蒸煮品质的影响,得知甘薯粉丝蒸煮品质受淀粉糊化特性影响最大,谷值黏度、崩解值、峰值时间、成糊温度与粉丝断条率呈显著相关($P < 0.05$),成糊温度与粉丝煮沸损失呈极显著正相关($P < 0.01$)。粉丝蒸煮品质也受淀粉组成的影响,其中粗蛋白含量与粉丝膨润度、总磷含量与粉丝断条率之间显著负相关($P < 0.05$)。评价制作甘薯粉丝的原料时,建议以淀粉的糊化特性、结晶度、粗蛋白含量、总磷含量为参考依据。主成分分析建立了综合评价粉丝的模型,可为粉丝加工型甘薯品种的推荐提供理论依据。

参考文献:

- 胡照根,张骏辉. 粉丝的质量监督与产品开发研究[J]. 企业技术开发, 1997, 16(3): 11-12, 19.
HU Zhaogen, ZHANG Junhui. Research on quality supervision and product development of vermicelli[J]. Technological Development of Enterprise, 1997, 16(3): 11-12, 19.
- 姚月华,唐宁,杨舒莹,等. 高抗性淀粉管碗豆粉丝的制备及品质评价[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 58-65.
YAO Yuehua, TANG Ning, YANG Shuying, et al. Evaluation on development and quality of high resistance starch vermicelli[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(6): 58-65.
- 陈嘉,高丽,叶发银,等. 基于近红外光谱与支持向量机的甘薯粉丝掺假快速检测[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(11): 211-218.
CHEN Jia, GAO Li, YE Fayin, et al. Rapid detection of adulterated sweet potato starch noodle by near-infrared spectroscopy and support vector machine[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(11): 211-218.
- 陈井旺,孙红男,木泰华. 我国粉条粉丝加工行业发展现状及政策建议[J]. 粮食加工, 2021, 46(6): 59-68.
CHEN Jingwang, SUN Hongnan, MU Taihua. Development status and policy suggestions of vermicelli processing industry in China [J]. Grain Processing, 2021, 46(6): 59-68.
- 范会平,许梦言,符锋,等. 甘薯淀粉性质与其面条品质的关系研究[J]. 粮食与饲料工业, 2021(2): 22-26.
FAN Huiping, XU Mengyan, FU Feng, et al. Study on the relationship between starch characteristics of sweet potato and noodle quality[J]. Cereal & Feed Industry, 2021(2): 22-26.
- 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 Hongzhuo, TAN Bin, LIU Ming, et al. Relationship between properties of sweet potato starch and qualities of sweet potato starch noodles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 286-292.
- 黄小平,王萍,刘敦华,等. 甘薯淀粉性质及所制粉丝品质的研究[J]. 粮食与食品工业, 2008, 15(2): 31-32, 40.

- HUANG Xiaoping, WANG Ping, LIU Dunhua, et al. Investigation on properties of sweet potato starches and quality of starch-noodles [J]. *Cereal & Food Industry*, 2008, 15(2): 31-32, 40.
- [8] 陆国权. 甘薯重要品质性状的基因型差异及其环境效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- LU Guoquan. Genotype variation and environmental effects on some important quality traits of sweetpotatoes (*Ipomoea batata* (L) Lam.)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [9] 张小燕, 杨炳南, 刘威, 等. 马铃薯主要营养成分的近红外光谱分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(2): 165-169.
- ZHANG Xiaoyan, YANG Bingnan, LIU Wei, et al. Analysis of main nutrients in potatoes by near infrared spectroscopy[J]. *Food Science*, 2013, 34(2): 165-169.
- [10] HSU C T, CHANG Y H, SHIAU S Y. Color, antioxidation, and texture of dough and Chinese steamed bread enriched with pitaya peel powder[J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96(1): 76-85.
- [11] ZHANG Z W, FAN X Y, MA H X, et al. Characterization of the baking-induced changes in starch molecular and crystalline structures in sugar-snap cookies[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 256: 117518.
- [12] 杜秀杰. 槟榔芋淀粉特性及其抗老化研究[D]. 厦门: 集美大学, 2012.
- DU Xiujie. Study on the properties and restraining retrogradation of pinang taro starch[D]. Xiamen: Jimei University, 2012.
- [13] LIU S Y, YUAN T Z, WANG X Y, et al. Behaviors of starches evaluated at high heating temperatures using a new model of rapid visco analyzer-RVA 4800[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 217-228.
- [14] RANI S, SINGH R, KAMBLE D B, et al. Structural and quality evaluation of soy enriched functional noodles[J]. *Food Bioscience*, 2019, 32: 100465.
- [15] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(15): 332-338.
- LIAO Luyan, WU Weiguo. Relationship between gelatinization and gel properties of different starch and their noodles[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(15): 332-338.
- [16] 唐忠厚, 张爱君, 陈晓光, 等. 低钾胁迫对甘薯块根淀粉理化特性的影响及其基因型差异[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(3): 513-525.
- TANG Zhonghou, ZHANG Aijun, CHEN Xiaoguang, et al. Starch physico-chemical properties and their difference in three sweetpotato (*Ipomoea batatas* (L.) lam) genotypes under low potassium stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(3): 513-525.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 金茂国, 吴嘉根, 吴旭初. 粉丝生产用淀粉性质及其与粉丝品质关系的研究[J]. *无锡轻工业学院学报*, 1995, 14(4): 307-312.
- JIN Maoguo, WU Jiagen, WU Xuchu. The properties of starches used for starch-noodle making and their relations with starch-noodle quality[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 1995, 14(4): 307-312.
- [20] ZHANG J Y, KONG H C, BAN X F, et al. Rice noodle quality is structurally driven by the synergistic effect between amylose chain length and amylopectin unit-chain ratio[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 295: 119834.
- [21] 杜秀芳. 臭氧处理对马铃薯淀粉白度及储藏品质影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- DU Xiufang. Study on the effects of studies on starch whiteness and the storage quality by ozone treatment[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [22] LEE CHANG Y, VERONIQUE K, JAWORSKI ANTONI W, et al. Enzymic browning in relation to phenolic compounds and polyphenoloxidase activity among various peach cultivars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1990, 38(1): 99-101.
- [23] 靳艳玲, 杨林, 丁凡, 等. 不同品种甘薯淀粉加工特性及其与磷含量的相关性研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(13): 46-51.
- JIN Yanling, YANG Lin, DING Fan, et al. Processing characteristics and correlation to phosphorus of different varieties of sweet potato starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(13): 46-51.
- [24] LIU C M, ZHANG Y J, LIU W, et al. Preparation, physicochemical and texture properties of texturized rice produce by improved extrusion cooking technology[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 54(3): 473-480.
- [25] 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 Lingwen, JU Xing, LI Xinxin, 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.
- [26] 游脚翔, 曾红亮, 陈培琳, 等. 动态高压微射流对淀粉结构特性和理化性质影响的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 307-315.
- YOU Qingxiang, ZENG Hongliang, CHEN Peilin, et al. Structural and physicochemical properties of modified starch by dynamic high pressure microfluidization: A review[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(19): 307-315.
- [27] 许立益, 余宏达, 江冬怡, 等. 紫米与籼米复配比对复配粉性质及紫米粉丝品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(17): 114-121.
- XU Liyi, YU Hongda, JIANG Dongyi, et al. Effects of the mixing ratio of purple rice and indica rice on the properties of mixed powder and the quality of purple rice noodles[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(17): 114-121.
- [28] 潘治利, 张垚, 艾志录, 等. 马铃薯淀粉糊化和凝胶特性与马铃薯粉品质的关系[J]. *食品科学*, 2017, 38(5): 197-201.
- PAN Zhili, ZHANG Yao, AI Zhilu, et al. Relationship between gelatinization and gelling properties of potato starch and potato noodles[J]. *Food Science*, 2017, 38(5): 197-201.
- [29] CHOI H S, KIM H S, PARK C S, et al. Ultra high pressure (UHP)-assisted acetylation of corn starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 78(4): 862-868.
- [30] 丘春平, 李义辉, 谢彩锋, 等. 木薯粉丝的研制及工艺优化[J]. *中国食品添加剂*, 2016(9): 156-163.
- QIU Chunping, LI Yihui, XIE Caifeng, et al. The development of Cassava noodle and process optimization[J]. *China Food Additives*, 2016(9): 156-163.
- [31] FENG Y Y, MU T H, ZHANG M, et al. Effects of ionic polysaccharides and egg white protein complex formulations on dough rheological properties, structure formation and *in vitro* starch digestibility of wet sweet potato vermicelli[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 1170-1179.
- [32] YAMAGUCHI M. B-cryptoxanthin and bone metabolism: The preventive role in osteoporosis[J]. *Journal of Health Science*, 2008, 54(4): 356-369.