

## 湿热处理对甘薯粉条食用品质及消化性能的影响

甘增鹏, 唐雪, 刘惠惠, 邓慧清, 廖卢艳\*

(湖南农业大学食品科学技术学院 长沙 410128)

**摘要** 为研究湿热处理对甘薯粉条食用品质的改善作用,在前期研究基础上,以甘薯粉条断条率(BR)、最大拉伸阻力(RTE)及消化性能【快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉(RS)含量】为品质评价指标,利用单因素实验和响应面法中的 Box-Behnken 试验设计模型优化甘薯淀粉的湿热处理条件。结果表明:淀粉含水量和湿热处理时间对甘薯粉条品质的影响极显著( $P < 0.01$ ),湿热处理温度对甘薯粉条品质的影响显著( $P < 0.05$ )。最佳湿热处理条件为:温度 95 °C,含水量 26%,时间 1 h。在此条件下,甘薯粉条 BR 为 3.33%,RTE 为 162.25 g,RDS 含量为 25.83%、SDS 含量为 27.07%、RS 含量为 45.38%。相较于原甘薯粉条,在最佳条件下获得的湿热处理甘薯粉条 BR、RDS 和 SDS 分别降低了 33.33%、29.94% 和 31.78%,RTE 和 RS 分别提高了 60.27% 和 108.84%。经反复验证,条件合理可行,研究结果为湿热处理提高甘薯粉条的口感和营养价值提供了理论依据。

**关键词** 响应面法; 湿热处理; 甘薯淀粉; 粉条品质; 消化性能

**文章编号** 1009-7848(2022)05-0169-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.05.019

甘薯,又名红薯、地瓜、山芋等,其种植范围广、产量大且营养丰富。据联合国粮农组织(FAO)统计,2017 年我国甘薯鲜薯产量约占全球甘薯总产量的 63%<sup>[1]</sup>。有数据表明,我国甘薯加工、鲜食和饲料三大用途分别占比 50%、30% 和 10% 左右(因有少量坏损)<sup>[2]</sup>,而在甘薯加工产业中,生产甘薯粉条占比为 28.3%<sup>[3]</sup>,市场需求很大。此外,由于原料理化性质的差异,甘薯粉条品质明显低于绿豆粉条,主要表现为粉条的蒸煮损失大、抗拉强度低、耐煮性差等<sup>[4]</sup>。研究改善甘薯粉条品质的方法,具有重大意义。

目前,粉条品质改善的方法主要有将不同淀粉混合<sup>[5]</sup>,使用添加剂<sup>[6]</sup>,研究粉条生产工艺<sup>[7-8]</sup>,淀粉改性(化学<sup>[9-10]</sup>、物理<sup>[11]</sup>、生物<sup>[12]</sup>)等。这些方法虽在一定程度上改善了粉条品质,但也产生了不利影响,如一些化学变性淀粉和化学添加剂的加入,不符合绿色食品的环保要求;不同淀粉混合不被消费者认可;生物改性增加了生产周期。此外,这

些研究中对粉条品质的考查指标大都集中在粉条的蒸煮品质(断条率、蒸煮损失率、膨胀度)、质构品质(拉伸性能、硬度),而将粉条消化特性作为粉条品质的评价指标,在国内外少有报道。甘薯粉条的基础原料——甘薯淀粉,是高血糖生成指数(Glycemic index, GI)型食品。餐后在人体内消化速率较快,导致血糖快速升高,容易引起肥胖、高血糖等慢性疾病。目前,人们对美好生活的需求日益增长,开始更多地关注食品的生理调节、疾病预防等营养健康功能。如何将淀粉基食品降糖成为食品科学研究的热点问题。

湿热改性(Heat moisture treatment, HTM)是一种常用的物理改性淀粉的方法,其一般条件为:淀粉的水分质量分数 10%~35%,在高于糊化温度条件下处理淀粉的方式,处理时间 15 min 至 16 h<sup>[13-14]</sup>。有研究表明,湿热处理可以通过增加高分子链的相互作用,破坏晶体结构,解离双螺旋结构,然后重新排列破坏的晶体,形成抗性淀粉(Resistant starch, RS)<sup>[15]</sup>。抗性淀粉对健康的益处包括降低餐后血糖水平、降低血清中的胆固醇含量、降低肠道 pH 值、促进肠道有益菌的生长、繁殖等<sup>[16-18]</sup>。本文在廖卢艳<sup>[19]</sup>研究的基础上,以甘薯淀粉为原料,以甘薯粉条断条率(BR)、最大拉伸阻力(RTE)及快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉含量为粉条品质评价指标,研究湿热处理条件

**收稿日期:** 2021-05-24

**基金项目:** 湖南省自然科学基金青年科学基金项目(2019JJ50262);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(18B125);湖南省重点领域研发计划项目(2019NK2131)

**作者简介:** 甘增鹏(1993—),男,硕士生

**通信作者:** 廖卢艳 E-mail: liaoluyan@126.com

(温度、含水量、时间)对粉条蒸煮、质构品质和消化特性的影响,为进一步提高甘薯粉条的品质提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

甘薯淀粉由张家界供销云商股份有限公司提供。

3,5-二硝基水杨酸、葡萄糖、氢氧化钠、硼酸、石油醚、醋酸钠、醋酸、苯酚(分析纯级),国药集团化学试剂有限公司; $\alpha$ -淀粉酶(50 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶(70 U/mg)、胃蛋白酶(250 U/mg),Sigma-Aldrich公司。

### 1.2 仪器与设备

101-2AB 电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;LXJ-IIIB 离心机,上海安亭科学仪器厂;AE 2204 电子分析天平,湘仪天平仪器设备有限公司;TQ-1000Y 高速多功能粉碎机,永康市天祺盛世工贸有限公司;K9840 自动凯氏定氮仪,山东海能科学仪器有限公司;SHZ-B 水浴恒温振荡器,常州华普达教学仪器有限公司;TA-XT2i Plus 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;PB-10 pH 计,美国 Sartorius 公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 甘薯淀粉主要成分测定 水分含量参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测定,总淀粉含量参照 GB 5009-2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》中的酸水解法测定;粗脂肪含量参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏提取法测定;粗蛋白含量参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法测定;直链淀粉含量的测定参照 GB/T 15683-2008《大米 直链淀粉含量的测定》中的方法。

#### 1.3.2 甘薯粉条蒸煮、质构品质的测定

1.3.2.1 粉条断条率测定 参考谭洪卓等<sup>[20]</sup>的方法将 20 根长 10 cm 的粉条样品在 500 mL 蒸馏水中煮沸 30 min,记录断条数,计算断条率。

$$\text{断条率}(\%) = \frac{\text{断条数}}{20} \times 100 \quad (1)$$

1.3.2.2 拉伸性能 取长度为 5 cm 的甘薯粉条 20 根,在 500 mL 蒸馏水中煮沸 15 min,捞出,冷却,备用。采用 AKIE 探头测定甘薯粉条的最大拉伸阻力。测试前速度:2.0 mm/s;测试时速度:1 mm/s;测试后速度:2.0 mm/s;触发力:自动-5 g;测量距离:75 mm;皮重模式:自动;数据采集速率:200 pps。仪器参数处理采用去掉最大值和最小值,取平均值。

1.3.3 甘薯粉条消化性能测定 湿热处理前、后甘薯粉条样品的消化性能依据 Englyst 等<sup>[21]</sup>的方法进行测定,稍加改动。具体方法如下:将粉条样品用粉碎机打碎后,过 100 目筛备用。准确称取 10 mg 样品放入装有 8 mL pH 5.2 的醋酸钠缓冲液的 50 mL 离心管中,振荡均匀,然后置于沸水浴中煮沸 20 min,取出冷却至 37 °C,将胃蛋白酶液及混合酶液放入 37 °C 水浴中平衡温度,然后向样品中加入 1 mL 胃蛋白酶(2 500 U/mL)溶液,在 37 °C 下水浴振荡 20 min(120 r/min),再加入 1 mL 37 °C 混合酶液( $\alpha$ -淀粉酶 170 U/mL 和淀粉葡萄糖苷酶 21 U/mL),在 37 °C 下水浴振荡 150 min(120 r/min)。分别在 20 min 和 120 min 时取 1 mL 水解液,放入装有 4 mL 0.4 mol/L 的氢氧化钠溶液的 15 mL 离心中。然后在 4 000 r/min 下离心 20 min,取 1 mL 上清液于 25 mL 螺口刻度试管中,加入 2 mL 3,5-二硝基水杨酸(DNS)试剂,沸水浴 5 min,流水迅速冷却,蒸馏水定容至 25 mL,于波长 560 nm 处测定吸光值。同时取 1 mL 蒸馏水作同样处理,作为空白。参考刘忠义等<sup>[22]</sup>的方法绘制葡萄糖标准曲线,测定上清液中的葡萄糖含量,并将葡萄糖含量乘以 0.9,分别计算 RDS 含量、SDS 含量、RS 含量,公式如下:

$$\text{RDS}(\%) = (G_{20} - \text{FG}) \times 0.9 \times 100 \quad (2)$$

$$\text{SDS}(\%) = (G_{120} - G_{20}) \times 0.9 \times 100 \quad (3)$$

$$\text{RDS}(\%) = \text{TS} - (\text{RDS} + \text{SDS}) \times 100 \quad (4)$$

式中, $G_{20}$ ——酶水解 20 min 后的葡萄糖含量, g/100 g; $G_{120}$ ——酶水解 120 min 后的葡萄糖含量, g/100 g;FG——酶水解前样品中的葡萄糖含量(以 0 计), g/100 g;TS——总淀粉含量, g/100 g。

1.3.4 甘薯粉条的制备 取 30 g 甘薯淀粉,于 150 mL 烧杯中,加入 60 g 水搅拌均匀后,倒入直径 18 cm 的蒸盘中,放入蒸锅中蒸 2 min,蒸完后

冷水漂 2~3 s, 40 ℃干燥 1 h 定型, 取出粉饼切成 1 cm 宽的粉条, 再将切好的粉条在 40 ℃下干燥至含水量低于 11% (约 5 h), 最后将制好的粉条装入自封袋保存, 备用。

1.3.5 湿热处理甘薯淀粉单因素实验 按照 1.3.4 节的工艺流程制作甘薯粉条, 湿热处理初始条件为温度 105 ℃、含水量 30%、时间 2 h。以粉条 BR、RTE 和 RDS 含量、SDS 含量、RS 含量为粉条品质评价指标, 采用单因素轮换法依次考察湿热处理温度 (85, 95, 105, 115, 125 ℃)、甘薯淀粉含水量 (18%, 22%, 26%, 30%, 34%)、湿热处理时间 (1, 2, 3, 4, 5 h) 对甘薯粉条品质的影响, 以未经湿热处理的原甘薯粉条为对照, 确定各因素的最佳湿热处理条件。

1.3.6 湿热处理甘薯粉条工艺优化响应面试验 根据单因素实验结果, 以甘薯淀粉湿热处理时的温度 (A)、淀粉含水量 (B) 及湿热处理时间 (C) 为自变量, 甘薯粉条的 BR 和 RTE 及 RDS 含量、SDS 含量、RS 含量的综合得分 Y 为响应值, 依据 Box-Behnken Design 中心组合试验设计原理, 使用 Design Expert 8.0.6 软件设计三因素三水平的响应面试验, 试验因素及水平见表 1。

表 1 响应面试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experiments design

因素	水平		
	-1	0	1
温度 (A)/℃	85	95	105
含水量 (B)/%	22	26	30
时间 (C)/h	1	2	3

## 1.4 数据处理

采用 Design Expert 8.0.6 软件进行响应面试验设计, SPSS 20.0 分析数据, Origin 2018 作图。由于湿热处理后的样品最终含水量存在些许差异, 本试验的总淀粉、RDS、SDS 及 RS 含量均换算为样品干基含量。每组试验均重复 3 次, 试验结果用“平均值±标准偏差”表示。

在响应面分析中, 对取值越小越好的因素 (BR、RDS) 和取值越大越好的因素 (RTE、SDS 含量、RS 含量) 采用 Hassan 方法分别进行数学转

换, 转化为 0~1 之间的值<sup>[23]</sup>, 公式如下:

$$D_{\min} = (d_{\max} - d_i) / (d_{\max} - d_{\min}) \quad (5)$$

$$D_{\max} = (d_i - d^{\min}) / (d_{\max} - d_{\min}) \quad (6)$$

式中,  $d_i$ ——每组试验所测得的真实值, g/100 g;  $d_{\max}$ ——试验组中的最高值, g/100 g;  $d_{\min}$ ——试验组中的最低值, g/100 g。

前期的研究结论证明湿热处理可以改善粉条的蒸煮及质构品质, 考虑到本文主要研究湿热处理对粉条消化性能的影响, 因此将 BR、RTE 权重均设为 0.2。在消化性能中, RS 对健康的益处尤为显著, 因此将 RDS 含量、SDS 含量和 RS 含量权重分别设为 0.1、0.1 和 0.4。得到包含粉条 BR、RTE 和 RDS 含量、SDS 含量、RS 含量的综合得分 Y, 公式如下:

$$\text{综合得分 } Y = D_{\min(\text{BR})} \times 0.2 + D_{\min(\text{RDS 含量})} \times 0.1 + D_{\max(\text{RTE})} \times 0.2 + D_{\max(\text{SDS 含量})} \times 0.1 + D_{\max(\text{RS 含量})} \times 0.4 \quad (7)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 甘薯淀粉组分

由表 2 可看出, 该样品的淀粉含量为 86.29%, 蛋白质含量仅为 1.46%, 脂肪未检出, 水分含量为 12.21%, 说明本试验淀粉样品纯度较高, 试验结果可信。

表 2 甘薯淀粉组分

Table 2 Components of sweet potato starch

成分	含量/%
总淀粉	86.29 ± 1.09
脂肪	未检出
蛋白质	1.46 ± 0.03
水分	12.21 ± 0.17
直链淀粉	30.06 ± 0.89

### 2.2 葡萄糖标准曲线

从图 1 中可知, 葡萄糖含量与相应的吸光度之间线性关系良好, 其回归方程为:  $y = 0.4454x + 0.0213$  ( $R^2 = 0.9988$ )。

### 2.3 湿热处理对甘薯粉条品质的影响

2.3.1 温度对湿热处理甘薯粉条品质的影响 由表 3 可知, 使用甘薯淀粉原样及 5 个不同温度处理的甘薯淀粉制作的粉条, BR、RTE、RDS 含量、

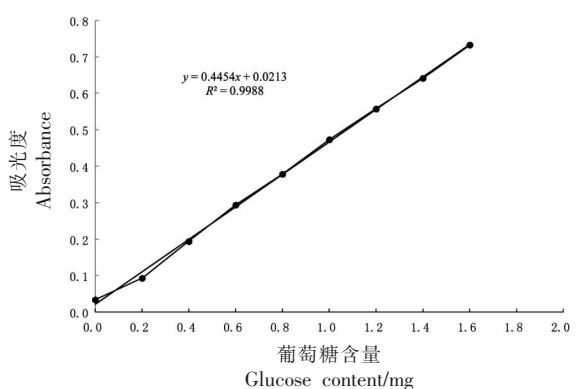


图1 葡萄糖标准曲线

Fig.1 Standard curve of glucose

SDS 含量及 RS 含量变异系数均较大 (最小值为 12.16%), 表明湿热处理温度对粉条品质影响很大。从总的趋势看, 粉条的品质随着湿热处理温度的升高先上升后降低, 与廖卢艳等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。在 85 °C 和 95 °C 时粉条 BR 虽优于原样, 但 3 者差异不显著 ( $P>0.05$ ), 当温度达到 105 °C 后, 粉条 BR 显著提高 ( $P<0.05$ )。RTE 在 105 °C 时达到最高, 为 139.23 g, 温度继续升高, 粉条 RTE 显著降低 ( $P<0.05$ )。原因可能是, 95 °C 的湿热处理温度

能够增强甘薯淀粉分子链间的相互作用, 导致分子有序化结构发生重排和取向, 使双螺旋结构及微晶更加完美; 而当温度过高时, 热能和水分分子的协同作用加强, 淀粉颗粒聚集态结构受到的破坏程度大于重排程度, 使淀粉短程无序化程度增加, 双螺旋结构解旋<sup>[25-27]</sup>。RDS 含量在 95 °C 时达到最低, 且与原样及其它湿热处理组样品的差异显著 ( $P<0.05$ ); 经湿热处理, 甘薯粉条 SDS 含量显著降低 ( $P<0.05$ ); 湿热处理使甘薯粉条 RS 含量显著提高 ( $P<0.05$ ), 在 95 °C 时达到最大值, 然后开始下降, 当温度升至 125 °C 时有所回升, 可能的原因是湿热处理使甘薯淀粉的直链淀粉/支链淀粉比值增大, 而直链淀粉比支链淀粉在回生时更易凝沉结晶形成 RS, 当温度继续升高, 支链淀粉的结晶被破坏, 导致 RS 含量有所下降, 而温度升至 125 °C 时, 随着直链淀粉/支链淀粉比值的继续增大, 直链淀粉的凝成占据主导地位, 导致 RS 含量回升<sup>[28]</sup>。由公式(7)计算各样品的综合得分, 得温度为 95 °C 时, 粉条综合得分为 0.86, 此时粉条品质最好。

表3 温度对湿热处理甘薯粉条品质的影响

Table 3 Effects of temperature on the quality of sweet potato vermicelli treated by heat moisture treatment

	BR/%	RTE/g	RDS 含量/%	SDS 含量/%	RS 含量/%
原样	5.00 ± 0.00 <sup>c</sup>	101.24 ± 3.92 <sup>d</sup>	36.87 ± 0.48 <sup>b</sup>	39.68 ± 0.60 <sup>a</sup>	21.73 ± 0.12 <sup>f</sup>
85 °C	0.00 ± 0.00 <sup>c</sup>	135.16 ± 5.38 <sup>ab</sup>	39.01 ± 0.48 <sup>a</sup>	29.01 ± 0.11 <sup>de</sup>	30.26 ± 0.57 <sup>e</sup>
95 °C	3.33 ± 0.06 <sup>c</sup>	126.73 ± 0.97 <sup>b</sup>	26.25 ± 0.52 <sup>f</sup>	31.52 ± 0.61 <sup>c</sup>	40.51 ± 1.12 <sup>a</sup>
105 °C	16.67 ± 0.06 <sup>b</sup>	139.23 ± 6.65 <sup>a</sup>	27.53 ± 0.45 <sup>e</sup>	33.38 ± 0.64 <sup>b</sup>	37.37 ± 0.23 <sup>c</sup>
115 °C	23.33 ± 0.06 <sup>b</sup>	112.70 ± 9.03 <sup>c</sup>	34.18 ± 0.29 <sup>e</sup>	29.46 ± 0.12 <sup>d</sup>	34.64 ± 0.41 <sup>d</sup>
125 °C	40.00 ± 0.10 <sup>a</sup>	92.75 ± 6.01 <sup>d</sup>	30.66 ± 0.46 <sup>d</sup>	28.28 ± 0.29 <sup>e</sup>	39.34 ± 0.25 <sup>b</sup>
标准差	13.89	17.17	4.68	3.88	6.42
变异系数	94.36%	14.55%	14.44%	12.16%	18.89%

注: 不同字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

### 2.3.2 含水量对湿热处理甘薯粉条品质的影响

由表 4 可知, 甘薯淀粉原样及 5 个不同含水量下湿热处理的甘薯粉条的 BR、RTE、RDS 含量、SDS 含量、RS 含量的变异系数均较大 (最小值为 8.90%), 表明甘薯淀粉的含水量对湿热处理甘薯粉条的品质有较大影响。BR 在含水量 34% 时最高, 达到 33.33%, 与原样及 18%, 22%, 26% 含水量下湿热

处理后的粉条差异显著 ( $P<0.05$ ), 而与 30% 含水量条件下湿热处理的粉条差异不显著 ( $P>0.05$ )。RTE 在 26% 时最大, 原样及 18%, 22%, 30%, 34% 含水量下湿热处理后的粉条差异均显著 ( $P<0.05$ )。原样的 RDS 含量和 SDS 含量分别为 36.87% 和 39.68%, 与经湿热处理后的甘薯粉条样品差异均显著 ( $P<0.05$ ), 表明在 105 °C 下湿热处理 2 h, 可

以显著降低甘薯粉条的 RDS 和 SDS 含量; 相较原样, 不同含水量的甘薯淀粉, 在 105 °C 下湿热处理 2 h 后制成的甘薯粉条 RS 含量均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 其中使用在 26% 含水量下经湿热处理的甘薯淀粉制成的粉条 RS 含量最高, 达到 42.04%, 当含水量继续增大, RS 含量逐渐降低。可能的原因是, 淀粉通过氢键作用结合部分水分子而分散, 使淀粉链的活动性和堆砌性增强, 淀粉团粒中的分子

发生重组, 淀粉结构中的结晶区更完善, 影响淀粉的膨润力和溶解率<sup>[29]</sup>, 进而影响甘薯粉条品质; 而当含水量继续增加, 水分子的迁移作用增强, 导致淀粉分子间氢键断裂, 双螺旋解旋, 部分结晶结构被破坏, 进而相对结晶度降低<sup>[30]</sup>, 粉条品质开始下降。由公式(7)计算各样品的综合得分, 含水量为 26% 时, 粉条综合得分为 0.90, 此时条件下, 湿热处理的粉条品质最好。

表 4 含水量对湿热处理甘薯粉条品质的影响

Table 4 Effects of water content on the quality of heat moisture treatment sweet potato vermicelli

	BR/%	RTE/g	RDS 含量/%	SDS 含量/%	RS 含量/%
原样	5.00 ± 0.00 <sup>b</sup>	101.24 ± 3.92 <sup>cd</sup>	36.87 ± 0.48 <sup>a</sup>	39.68 ± 0.60 <sup>a</sup>	21.73 ± 0.12 <sup>d</sup>
18%	3.33 ± 0.06 <sup>b</sup>	95.71 ± 6.61 <sup>d</sup>	32.88 ± 0.91 <sup>b</sup>	34.27 ± 0.21 <sup>b</sup>	31.13 ± 0.70 <sup>e</sup>
22%	10.00 ± 0.08 <sup>b</sup>	125.60 ± 5.72 <sup>b</sup>	29.81 ± 1.18 <sup>c</sup>	31.12 ± 0.46 <sup>c</sup>	37.35 ± 1.65 <sup>b</sup>
26%	3.33 ± 0.06 <sup>b</sup>	147.78 ± 7.33 <sup>a</sup>	28.33 ± 0.25 <sup>d</sup>	27.92 ± 0.91 <sup>d</sup>	42.04 ± 1.10 <sup>a</sup>
30%	20.00 ± 0.10 <sup>ab</sup>	113.05 ± 12.35 <sup>bc</sup>	31.63 ± 0.07 <sup>b</sup>	28.66 ± 0.36 <sup>d</sup>	37.99 ± 0.31 <sup>b</sup>
34%	33.33 ± 0.15 <sup>a</sup>	101.35 ± 9.69 <sup>cd</sup>	29.62 ± 0.79 <sup>c</sup>	31.02 ± 0.13 <sup>c</sup>	37.64 ± 0.67 <sup>b</sup>
标准差	10.96	17.95	2.80	3.95	6.60
变异系数	87.70%	15.73%	8.90%	12.30%	19.04%

### 2.3.3 处理时间对湿热处理甘薯粉条品质的影响

由表 5 可知, 甘薯淀粉原样粉条与经不同时间湿热处理的粉条样品中 RDS 含量的变异系数最小, 仅为 6.59%, 表明在 1~5 h 内, 不同湿热处理时间对甘薯粉条的 RDS 含量影响不大。SDS 含量和 RS 含量的变异系数分别为 12.94% 和 15.72%, 表明时间的增加对 SDS 及 RS 的含量有较大影响。BR 的变异系数最高, 为 87.56%, 而湿热处理时间 3 h 以内, 甘薯粉条的 BR 与原样差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 表明在 105 °C、30% 含水量条件下, 湿热处

理时间需控制在 3 h 以内; 湿热处理时间 1~4 h 时粉条的 RTE 相较原样显著增强, 当达到 5 h 时, 粉条拉伸阻力已低于原样, 原因可能是在湿热处理过程中, 淀粉颗粒内部结构重新排列, 有助于直链-直链、直链-支链、支链-支链间相互作用, 形成更有序的淀粉簇, 双螺旋结构结合的更加紧密<sup>[31]</sup>, 随着湿热处理过程的继续, 直链淀粉比例显著增加, 淀粉层状结构的层间质点结合力减弱, 更易受到破坏, 层状结构的非结晶区及螺旋结构同时受到破坏<sup>[32]</sup>。总体来看, 随着湿热处理时间的增

表 5 处理时间对湿热处理甘薯粉条品质的影响

Table 5 Effects of treatment time on the quality of heat moisture treatment sweet potato vermicelli

	BR/%	RTE/g	RDS 含量/%	SDS 含量/%	RS 含量/%
原样	5.00 ± 0.00 <sup>b</sup>	101.24 ± 3.92 <sup>bc</sup>	36.87 ± 0.48 <sup>a</sup>	39.68 ± 0.60 <sup>a</sup>	21.73 ± 0.12 <sup>c</sup>
1 h	6.67 ± 0.11 <sup>b</sup>	139.53 ± 13.18 <sup>a</sup>	31.29 ± 0.93 <sup>b</sup>	30.21 ± 0.53 <sup>b</sup>	36.78 ± 0.39 <sup>a</sup>
2 h	7.50 ± 0.15 <sup>b</sup>	136.35 ± 21.17 <sup>a</sup>	35.81 ± 0.27 <sup>a</sup>	29.24 ± 0.12 <sup>c</sup>	33.23 ± 0.15 <sup>c</sup>
3 h	15.00 ± 0.07 <sup>b</sup>	126.44 ± 7.05 <sup>ab</sup>	31.75 ± 0.50 <sup>b</sup>	29.98 ± 0.24 <sup>bc</sup>	36.55 ± 0.25 <sup>a</sup>
4 h	36.67 ± 0.12 <sup>a</sup>	125.21 ± 6.50 <sup>ab</sup>	36.27 ± 0.47 <sup>a</sup>	27.13 ± 0.27 <sup>d</sup>	34.88 ± 0.20 <sup>b</sup>
5 h	53.33 ± 0.06 <sup>a</sup>	88.37 ± 12.41 <sup>c</sup>	36.35 ± 0.89 <sup>a</sup>	29.80 ± 0.42 <sup>bc</sup>	32.13 ± 0.47 <sup>d</sup>
标准差	18.12	18.57	2.29	4.01	5.12
变异系数	87.56%	15.53%	6.59%	12.94%	15.72%

加,粉条的 RTE 先增加,后减弱。经湿热处理样品的 SDS 含量显著低于原样( $P<0.05$ ),而 RS 含量显著高于原样( $P<0.05$ ),可能是由于湿热处理增强了无定型区的分子链相互作用<sup>[33]</sup>。由公式(7)计算各样品的综合得分,得湿热处理时间为 1 h 时,粉条综合得分为 0.92,此条件下的粉条品质最好。

## 2.4 湿热处理条件响应面试验结果

### 2.4.1 BOX-Behnken 试验设计及结果

根据单因素实验结果,利用 Box-Behnken 试验设计原理对温度(A)、含水量(B)、时间(C)3个因素设计了三因素三水平共 17 组试验。Box-Behnken 试验因素与水平见表 6。

表 6 响应面试验设计及结果

Table 6 Response surface test design and results

试验号	温度(A)/ ℃	含水量 (B)/%	时间(C)/ h	综合 得分 Y	试验号	温度(A)/ ℃	含水量 (B)/%	时间(C)/ h	综合 得分 Y
1	85.00	22.00	2.00	0.73	10	95.00	30.00	1.00	0.84
2	105.00	22.00	2.00	0.71	11	95.00	22.00	3.00	0.72
3	85.00	30.00	2.00	0.75	12	95.00	30.00	3.00	0.78
4	105.00	30.00	2.00	0.78	13	95.00	26.00	2.00	0.85
5	85.00	26.00	1.00	0.81	14	95.00	26.00	2.00	0.85
6	105.00	26.00	1.00	0.82	15	95.00	26.00	2.00	0.86
7	85.00	26.00	3.00	0.73	16	95.00	26.00	2.00	0.86
8	105.00	26.00	3.00	0.77	17	95.00	26.00	2.00	0.85
9	95.00	22.00	1.00	0.81					

### 2.4.2 模型方程的建立与显著性检验

根据表 6 的试验结果,使用 Design Expert 8.0.6 软件对甘薯粉条综合得分 Y 和各因素进行多元回归分析,得到 Y 与湿热处理温度、含水量、时间的回归方程

为: $Y=0.85+0.0075A+0.023B-0.035C+0.012AB+0.0075AC+0.0075BC-0.058A^2-0.053B^2-0.013C^2$ 。

对表 6 响应面试验结果进行方差分析验证回归方程的有效性,结果如表 7 所示。

表 7 Box-Behnken 试验结果方差分析

Table 7 Analysis of variance of Box-Behnken test results

方差来源	自由度	离均差平方和	均方	F 值	P 值	
模型	9	0.045	$4.96\times 10^{-3}$	93.87	< 0.0001	**
A	1	0.00045	$4.50\times 10^{-4}$	8.51	0.0224	*
B	1	0.00405	$4.05\times 10^{-3}$	76.62	< 0.0001	**
C	1	0.0098	$9.80\times 10^{-3}$	185.41	< 0.0001	**
AB	1	0.000625	$6.25\times 10^{-4}$	11.82	0.0109	*
AC	1	0.000225	$2.25\times 10^{-4}$	4.26	0.078	
BC	1	0.000225	$2.25\times 10^{-4}$	4.26	0.078	
A <sup>2</sup>	1	0.014	0.014	270.29	< 0.0001	**
B <sup>2</sup>	1	0.012	0.012	225.88	< 0.0001	**
C <sup>2</sup>	1	0.000739	$7.39\times 10^{-4}$	13.99	0.0073	**
残差	7	0.00037	$5.29\times 10^{-5}$			
失拟项	3	0.00025	$8.33\times 10^{-5}$	2.78	0.1744	
纯误差	4	0.00012	$3.00\times 10^{-5}$			
总和	16	0.045				
		$R^2=0.9918$	$R^2_{Adj}=0.9812$			

注:“\*”表示差异显著( $P<0.05$ ),“\*\*”表示差异极显著( $P<0.01$ )。

由表 7 可知,回归模型  $P < 0.0001$ ,表明显著具有统计学意义。决定系数  $R^2 = 0.9918$ ,表明组试验的实际值与预测结果有着较好的一致性;模型复合相关系数  $R^2_{Adj} = 0.9812$ ,表明试验结果有 98.12% 受试验因素的影响;变异系数(Coefficient of variation, CV)为 0.91%,表明模型方程预测值与实际值离散程度小;模型失拟项 P 值为 0.1744,差异不显著( $P > 0.05$ ),说明模型拟合度较好,能较好的反映实际情况。综上所述,该模型可用于分析和预测甘薯粉条综合得分。

使用方差分析判断湿热处理温度、含水量、时间对粉条品质综合得分  $Y$  的影响。由表 7 可知,模型中的交互项  $AB$  对响应值  $Y$  的影响显著 ( $P < 0.05$ ),  $AC$ 、 $BC$  对响应值  $Y$  则无显著影响 ( $P > 0.05$ );模型

中的一次项  $A$  对综合值  $Y$  的影响显著 ( $P < 0.05$ ),  $B$  和  $C$  对综合值  $Y$  的影响均达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。根据各因素  $F$  值的大小可以判断影响甘薯粉条品质的湿热处理因素主次顺序为:时间 > 含水量 > 温度。

2.4.3 各因素交互作用的响应面分析 利用 Design Expert 8.0.6 软件绘制了响应面曲线图。曲面越陡峭、倾斜度越高说明各因素之间的交互作用对响应值的影响越大;同一等高线上的每个点表示的数值相同,而等高线的疏密程度及呈现的形状可以反映各因素之间的交互作用的显著性<sup>[34-35]</sup>。图 2 可以反映湿热处理甘薯淀粉制作的甘薯粉条综合得分随湿热处理温度( $A$ )、淀粉含水量( $B$ )和湿热处理时间( $C$ )的变化规律。图 2b 等高线分布

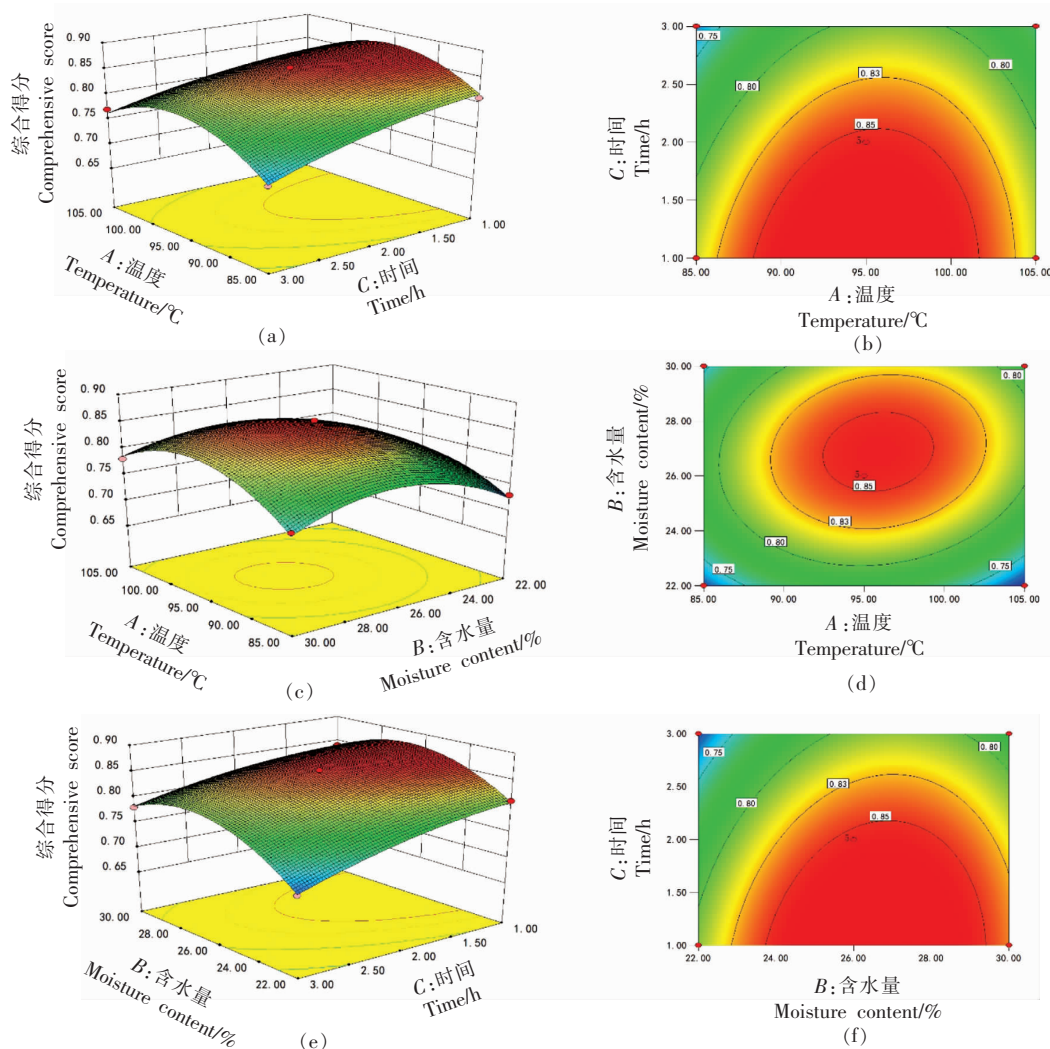


图 2 温度、含水量、时间之间交互作用对综合值  $Y$  得影响

Fig.2 Effects of interaction of temperature, moisture content and time on the comprehensive score  $Y$

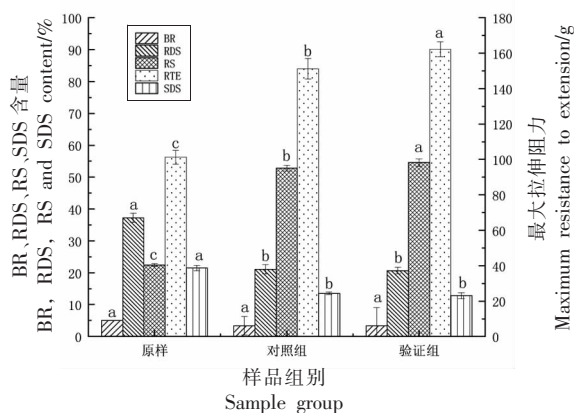
密集,对应曲面(图 2a)陡峭,呈椭圆形,3D 曲面朝下且存在顶点,表明湿热处理温度和含水量对综合得分  $Y$  交互作用明显,与表 7 的数据有着较好的一致性。

2.4.4 验证试验 在各因素选定范围内,综合值  $Y$  最高时,湿热处理条件为:温度 95.15 °C、含水量 26.57%、时间 1 h。为满足实际可操作的需求,将最佳湿热处理条件修正为:温度 95 °C、含水量 26%、时间 1 h。为验证此检验模型的准确性,按调整后湿热处理条件进行试验,以响应面试验组中综合值  $Y$  最高的组作为优化对照组,其湿热处理条件为:温度 95 °C、含水量 26%、时间 2 h,此时甘薯粉条的粉条 BR、RTE 和 RDS 含量、SDS 含量、RS 含量分别为 3.33%、151.21 g、26.39%、28.74%、43.15%,同时用原甘薯粉条作空白对照,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在模拟预测的湿热处理条件下,甘薯粉条的 RTE、RS 含量分别为 162.25 g、45.38%,显著高于对照组的 RTE 及 RS 含量( $P < 0.05$ );而 RDS 及 SDS 与对照组差异不显著( $P < 0.05$ )。对照组及验证组的 RTE、RDS、SDS、RS 含量与原样均有显著性差异;BR 与原样无显著差异( $P > 0.05$ )。总体来看,优化条件后的甘薯粉条品质显著提高,优化工艺具有一定可行性。

### 3 结论

本文以甘薯粉条 BR、RTE 及 RDS 含量、SDS 含量、RS 含量为粉条品质评价指标,通过单因素实验和响应面优化分析得出,湿热处理的温度对粉条品质影响显著( $P < 0.05$ ),湿热处理的淀粉含水量、处理时间对甘薯粉条品质影响极显著( $P < 0.01$ )。湿热处理的最佳条件为:温度 95 °C、含水量 26%、时间 1 h。相较于原甘薯粉条,在此最佳条件下制作的甘薯粉条 BR 降低了 33.33%,RTE 提高了 60.27%,RDS 含量降低了 29.94%、SDS 含量降低了 31.78%、RS 含量提高了 108.84%。证明了湿热处理在改善甘薯粉条质构、蒸煮品质的同时也可以改变甘薯粉条中的 RDS、SDS、RS 的比例,使得甘薯粉条具有更好的营养价值,为湿热处理在甘薯粉条实际生产中的应用提供参考。



注:不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

图 3 验证试验结果

Fig.3 Verification test results

### 参 考 文 献

- [1] 联合国粮农组织. 联合国粮食及农业组织统计资料 [EB/OL]. (2020-10-21)[2020-12-24]. <http://www.fao.org/statistics/zh/>.  
Food and Agricultural Organization of the United Nations. United Nations Food and Agriculture Organization statistics [EB/OL]. (2020-10-21)[2020-12-24]. <http://www.fao.org/statistics/zh/>.
- [2] 陆建珍, 徐雪高, 汪翔, 等. 中国甘薯及其加工品进出口贸易现状分析[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(4): 30-35, 87.  
LU J Z, XU X G, WANG X, et al. Analysis on the status of import and export trade of sweetpotato and its processing products in China[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(4): 30-35, 87.
- [3] 中国淀粉工业协会甘薯淀粉专业委员会. 2017 年中国淀粉工业协会甘薯淀粉专业委员会年报[R]. (2017-12-26)[2020-12-24]. [http://www.ganshudianfen.com/?news\\_8/](http://www.ganshudianfen.com/?news_8/).  
Sweet Potato Starch Professional Committee, China Starch Industry Association. Annals of the sweet potato starch professional committee, Chinese starch industry association, 2017[R]. (2017-12-26)[2020-12-24]. [http://www.ganshudianfen.com/?news\\_8/](http://www.ganshudianfen.com/?news_8/).
- [4] 谭洪卓. 甘薯淀粉流变学、热力学特性和分子结构研究及其在粉丝生产中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2007.  
TAN H Z. Study on rheology, thermodynamic prop-



- erties and molecular structure of sweet potato starch and its application in noodle production[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007.
- [5] SANDHU K S, KAUR M. Studies on noodle quality of potato and rice starches and their blends in relation to their physicochemical, pasting and gel textural properties[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2010, 43(8): 1289–1293.
- [6] 崔晓, 王天宇, 徐淑科, 等. 复合食品胶对无矾小麦淀粉粉条的品质影响[J]. *中国食品添加剂*, 2019, 30(9): 145–149.
- CUI X, WANG T Y, XU S K, et al. Combination usage of food gums on the quality of non-alim wheat starch noodle[J]. *China Food Additives*, 2019, 30(9): 145–149.
- [7] 李健雄, 杨艾迪, 唐小俊, 等. 南方波纹米粉丝的热泵-热风组合干燥工艺研究[J]. *食品科学技术学报*, 2018, 36(2): 69–77.
- LI J X, YANG A D, TANG X J, et al. Combined drying of heat pump with hot air for southern corrugated rice noodles[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 36(2): 69–77.
- [8] 杨艾迪, 魏振承, 张雁, 等. 水磨结合干磨制粉对米粉品质影响及工艺优化[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(8): 111–117.
- YANG A D, WEI Z C, ZHANG Y, et al. Effect of water milling combined with dry milling on quality of rice noodles and process optimization[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(8): 111–117.
- [9] MUHAMMAD K, KUSNANDAR F, MAT HASHIM D, et al. Application of native and phosphorylated tapioca starches in potato starch noodle[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1999, 34(3): 275–280.
- [10] 孙琛, 曹余, 何绍凯, 等. 两种酯化变性淀粉用于无明矾粉丝的制作研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2013(9): 35–38.
- SUN C, CAO Y, HE S K, et al. Effect of two kinds of esterified modified starch on the quality of alum-free vermicelli[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2013(9): 35–38.
- [11] PURWANI E Y, WIDANINGRUM W, THAHIR R, et al. Effect of heat moisture treatment of sago starch on its noodle quality[J]. *Ipb*, 2013, 7(1): 8.
- [12] 刘惠惠, 廖卢艳. 乳酸湿热处理改善大米粉性质及粉条品质的研究[J]. *粮油食品科技*, 2020, 28(4): 105–112.
- LIU H H, LIAO L Y. Study on improving the properties of rice flour and rice vermicelli quality by heat treatment with lactic acid solutions[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2020, 28(4): 105–112.
- [13] 杨凤, 姚天鸣, 叶晓汀, 等. 湿热处理技术对淀粉理化特性影响的研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2015, 23(1): 21–24.
- YANG F, YAO T M, YE X T. Research progress in the effect of heat - moisture treatment on starch physicochemical properties [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2015, 23(1): 21–24.
- [14] 刁静静, 陈明霞, 李强双, 等. 湿热处理对高粱淀粉理化性质的影响[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2015, 27(5): 82–86.
- DIAO J J, CHEN M X, LI Q S, et al. Effects of heat-moisture treatment on physicochemical properties of white sorghum starch [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2015, 27(5): 82–86.
- [15] PRATIWI M, FARIDAH D N, LIOE H N. Structural changes to starch after acid hydrolysis, debranching, autoclaving - cooling cycles, and heat moisture treatment (HMT): A review[J]. *Starch - Stärke*, 2018, 70(1/2): 1700028.
- [16] 徐忠. 功能性变性淀粉[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 57–59.
- XU Z. Functionally denatured starch [M]. Peking: China Light Industry Press, 2010: 57–59.
- [17] 郑洁, 曾小庆, 宋德明, 等. 高抗性淀粉大米对2型糖尿病患者血糖的影响研究[J]. *重庆医学*, 2020, 49(18): 3033–3036.
- ZHENG J, ZENG X Q, SONG D M, et al. Effects of high resistant starch rice on blood glucose of type 2 diabetes patients[J]. *Chongqing Medicine*, 2020, 49(18): 3033–3036.
- [18] 李蒙蒙. 小麦抗性淀粉的制备及结构性质研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- LI M N. Preparation, structure and properties of resistant starch from wheat starch[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [19] 廖卢艳. 基于粉丝生产的湿热改性甘薯淀粉性质及机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.

- LIAO L Y. Research on the heat-moisture modification of sweet potato starch properties and mechanism based on the production of starch vermicelli [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [20] 谭洪卓, 陈素芹, 谷文英. 粉丝品质评价标准的补充建议[J]. 粮油加工, 2006(3): 78-81, 84.
- TAN H Z, CHEN S Q, GU W Y. Supplementary suggestions for the evaluation criteria of vermicelli quality [J]. Cereals and Oils Processing, 2006 (3): 78-81, 84.
- [21] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46: S33.
- [22] 刘忠义, 欧昌荣, 汤海青, 等. 3, 5-二硝基水杨酸法测定葡萄酒中总糖含量的条件优化[J]. 核农学报, 2013, 27(11): 1717-1723.
- LIU Z Y, OU C R, TANG H Y, et al. Optimization of conditions for determination of total sugar contents in wine by 3, 5-dinitrosalicylic acid method[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(11): 1717-1723.
- [23] 吴伟, 崔光华, 陆彬. 实验设计中多指标的优化: 星点设计和总评“归一得分”的应用[J]. 中国药理学杂志, 2000(8): 26-29.
- WU W, CUI G H, LU B. Optimization of multiple variables: Application of central composite design and overall desirability [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2000(8): 26-29.
- [24] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热处理改善红薯粉条品质的优化工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(10): 114-119, 130.
- LIAO L Y, WU W G. Optimized technology for improving sweet potato starch noodle by heat-moisture treatment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(10): 114-119, 130.
- [25] 刘星, 范楷, 司文帅, 等. 谷粒湿热处理对薏仁米淀粉形态、结构与热特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 128-133.
- LIU X, FAN K, SI W S, et al. Morphology, structure and thermal properties of starch from heat-moisture treated coix seeds[J]. Food Science, 2018, 39(19): 128-133.
- [26] 王宏伟, 丁江涛, 张艳艳, 等. 湿热处理对薏米淀粉聚集态结构及糊化特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 111-117.
- WANG H W, DING J T, ZHANG Y Y, et al. Impact of heat moisture treatment on the aggregation structure and pasting behavior of adlay starch [J]. Food Science, 2020, 41(17): 111-117.
- [27] ZHANG J, WANG Z W, SHI X M. Effect of microwave heat/moisture treatment on physicochemical properties of *Canna edulis* Ker starch[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(4): 653-664.
- [28] 付蕾, 田纪春. 抗性淀粉制备、生理功能和应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 206-210.
- FU L, TIAN J C. Research progress on preparation, physiological function and application of resistant starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008, 23(2): 206-210.
- [29] 张民, 吴娜, 董家美, 等. 不同改性方法对大米淀粉理化性质及颗粒结构的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(1): 19-23.
- ZHANG M, WU N, DONG J M, et al. Effects of different modification on physicochemical properties and granule structure of rice starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(1): 19-23.
- [30] TAN X Y, LI X X, CHEN L, et al. Effect of heat-moisture treatment on multi-scale structures and physicochemical properties of breadfruit starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 161: 286-294.
- [31] 李照茜, 文晓语, 金凤, 等. 湿热处理对板栗淀粉结构及理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 69-74, 80.
- LI Z X, WEN X Y, JIN F, et al. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of chestnut starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 69-74, 80.
- [32] 毛海锋. 碎米淀粉及其磷酸酯的制备和理化性质研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- MAO H F. Preparation and physicochemical properties of broken rice starch and its phosphate [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009.
- [33] GUNARATNE A, HOOVER R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2002, 49(4): 425-437.
- [34] 樊少飞, 吴卫国, 廖卢艳, 等. 南方馒头冷冻面团生产技术研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(2): 148-153.

- FAN S F, WU W G, LIAO L Y, et al. Production technology of frozen dough for southern steamed bread[J]. *China Brewing*, 2019, 38(2): 148–153.
- [35] JIANG Y Q, WANG H, ZHAO C F, et al. Establishment of stable microalgal–bacterial consortium in liquid digestate for nutrient removal and biomass accumulation[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 268: 300–307.

### Effect of Heat Moisture Treatment on Edible Quality and Digestibility of Sweet Potato Vermicelli

Gan Zengpeng, Tang Xue, Liu Huihui, Deng Huiqing, Liao Luyan\*

(School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

**Abstract** In order to further study the effect of heat moisture treatment on the edible quality of sweet potato vermicelli, on the basis of previous research, the breakage rate (BR), resistance to extension (RTE) and digestibility of vermicelli [rapid digestible starch (RDS), slowly digestible starch (SDS), and resistant starch (RS)] content were used as the quality evaluation indicators of vermicelli. The single factor test and the Box–Behnken test design model in the response surface method were used to optimize the heat moisture treatment conditions of sweet potato starch. The results showed that the water content of starch and the time of heat moisture treatment had an extremely significant effect on the quality of sweet potato vermicelli ( $P<0.01$ ), and the temperature of heat moisture treatment had a significant effect on the quality of sweet potato vermicelli ( $P<0.05$ ). The best heat moisture treatment conditions were temperature 95 °C, water content of starch 26%, time 1 h. Under these conditions, the BR of the sweet potato vermicelli was 3.33%, the RTE was 162.25 g, the dry basis RDS was 25.83%, the SDS was 27.07%, and the RS was 45.38%. Compared to the original sweet potato starch vermicelli, the BR, RDS and SDS of the optimal conditions heat moisture treatment sweet potato starch vermicelli were respectively reduced by 33.33%, 29.94% and 31.78%, the RTE and RS respectively increased by 60.27% and 108.84%. The replicated stable results proved that the conditions were reasonable and feasible, and the research results provided a theoretical basis for improving the taste and nutritional value of sweet potato vermicelli by heat moisture treatment.

**Keywords** response surface method; heat moisture treatment; sweet potato starch; vermicelli quality; digestibility