

高雪丽, 赵丹, 李光辉, 等. 添加抗性淀粉对红薯粉条理化性能及结构的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 114-120. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110129

GAO Xueli, ZHAO Dan, LI Guanghui, et al. Effect of Resistant Starch on the Physicochemical Properties and Structure of Sweet Potato Starch Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 114-120. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110129

· 研究与探讨 ·

添加抗性淀粉对红薯粉条理化性能及结构的影响

高雪丽^{1,2}, 赵丹^{1,3}, 李光辉^{1,2}, 王永辉^{1,2}, 何胜华^{1,2}, 黄继红^{1,2}, 张贺晴¹, 郭卫芸^{1,2,*}

(1. 许昌学院食品与药学院, 河南许昌 461000;

2. 功能食品绿色制造河南省协同创新中心, 河南许昌 461000;

3. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266000)

摘要: 为了探究在粉条中加入玉米抗性淀粉和红薯抗性淀粉对其理化性能及结构品质的影响, 测定抗性淀粉添加量分别在 5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 g/100 g 下所制备粉条的质构特性、断条率、感官品质、微观结构、体外消化性能等指标的变化情况。结果显示: 在抗性淀粉添加量相同时, 玉米抗性淀粉粉条硬度和咀嚼性均高于红薯抗性淀粉粉条; 随抗性淀粉添加量的增多, 两种抗性淀粉粉条硬度和咀嚼性都呈下降趋势; 红薯抗性淀粉添加量的升高对粉条内聚性的升高具有显著 ($P<0.05$) 影响, 对弹性的影响不大; 玉米抗性淀粉添加量的升高对粉条内聚性和弹性影响较小; 两种抗性淀粉粉条结晶度和断条率均随抗性淀粉添加量增加而升高, 且两种抗性淀粉在粉条中的适宜添加量均为 5.0 g/100 g; 经体外消化 2 h 后, 红薯抗性淀粉粉条和玉米抗性淀粉粉条消化率分别为 20.2% 和 23.3%, 而空白组消化率为 27.8%, 表明两种抗性淀粉均具备良好的抗消化性能。

关键词: 抗性淀粉, 粉条, 理化性能, 结构, 消化性能

中图分类号: TS205

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)14-0114-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110129

本文网刊:



Effect of Resistant Starch on the Physicochemical Properties and Structure of Sweet Potato Starch Noodles

GAO Xueli^{1,2}, ZHAO Dan^{1,3}, LI Guanghui^{1,2}, WANG Yonghui^{1,2}, HE Shenghua^{1,2}, HUANG Jihong^{1,2}, ZHANG Heqing¹, GUO Weiyun^{1,2,*}

(1. Food and Pharmacy College, Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. Collaborative Innovation Center of Green Manufacturing of Functional Foods, Xuchang 461000, China;

3. Food Science and Engineering College, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of adding corn resistant starch (CRS) and sweet potato resistant starch (SRS) to starch noodles (SNs) on their physicochemical properties and structural quality, the changes in texture quality, breakage rate, sensory quality, microstructure, and *in vitro* digestibility of the two types of resistant starch noodles (RSNs) prepared with resistant starch (RS) added at 5.0, 7.5, 10.0, 12.5 and 15.0 g/100 g, respectively were measured. The results showed that the hardness and chewiness of corn resistant starch noodles (CRSNs) are higher than those of sweet potato resistant starch noodles (SRSNs) when the amounts of the two RSeS added are the same, and the hardness and chewiness of both RSNs showed a decreasing trend when the addition amount of RS increases. The increase in the amount of RS added had a significant ($P<0.05$) impact on the cohesiveness of the SNs, but with a relatively small impact on elasticity. The increase in

收稿日期: 2023-11-15

基金项目: 河南省高等学校骨干教师项目 (2020GGJS206); 河南省大学生创新创业项目 (202310480047)。

作者简介: 高雪丽 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 功能性食品研究及评价, E-mail: gaoxueli83@yeah.net。

* 通信作者: 郭卫芸 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工及食品检测, E-mail: gwy2002@126.com。

the amount of CRS added had no significant effect on the cohesiveness and elasticity of SNs. The crystallinity and breakage rate of the two RSNs increased with the increase of RS addition amount. The appropriate amount of two RS added to noodles was 5.0 g/100g. The 2 hours *in vitro* digestion rates of SRSNs and CRSNs were 20.2% and 23.3%, respectively, while the blank was 27.8%, indicating that both types of RSNs had good resistance to digestion performance.

Key words: resistant starch; noodle; physicochemical properties; structure; digestive performance

粉条属于淀粉类凝胶制品,是通过和浆、漏芡、熟化、冷却、晾晒、包装等工艺制作而成的一种条状或丝状的产品,是我国的传统食品。抗性淀粉是一种广泛存在于各种天然淀粉作物中的碳水化合物,可以利用物理、化学或酶处理等方法来改变天然淀粉特性而获得^[1]。根据来源和抗酶解性的不同,抗性淀粉分为 RS1、RS2、RS3、RS4,也有第 5 类抗性淀粉(RS5)的研究报道^[2]。

抗性淀粉已经被广泛应用于普通食品,如面包、面条、粉条、韧性饼干、饮料类和肉制品等以及微胶囊化的相关产品^[3]。研究发现,在食品中加入抗性淀粉会使产品具有人体有益的生理功能,如减少肠道疾病、稳定餐后血糖、降低胆固醇、减少胆结石形成、抑制脂肪在体内堆积、促进微量元素的吸收和利用、降低食物对胃的损伤程度等有益作用等^[4-5]。尚晓娅等^[6]对抗性淀粉体外模拟消化性能的研究发现,抗性淀粉具有抗小肠消化作用,但能被大肠中的微生物利用而产生挥发性短链脂肪酸。在食品中加入抗性淀粉,可以满足肥胖人群、糖尿病人、肠道疾病患者、癌症患者等特殊人群所需营养素的膳食需求^[7-8]。然而,当前具有相应功能的产品种类相对较少,不能满足市场需求。

本研究采用红薯抗性淀粉、玉米抗性淀粉以及普通淀粉为原料制备粉条,通过测定粉条感官指标、断条率、质构特性、红外光谱、结晶度、微观结构和体外消化性能等,确定添加抗性淀粉的适宜用量,为提供一种具有一定抗消化和低热量特性的粉条生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红薯淀粉 二级,秦皇岛十八里食品有限公司;红薯抗性淀粉 食品级,纯度 $\geq 72.5\%$,广州市顺华生物科技有限公司;玉米抗性淀粉 食品级,纯度 $\geq 66\%$,北京涌悦科技有限公司;乙酸、苯酚、氢氧化钠

分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;3,5-二硝基水杨酸 分析纯,成都市冀龙化工物品厂;酒石酸钾钠 分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司;偏重亚硫酸钠 分析纯,天津市福晨化学试剂厂。

C21-RK210 型电磁炉 广东美的生活电器制造有限公司;101 型电热鼓风干燥箱 北京科伟永兴仪器有限公司;DK-8D 型电热恒温水浴锅 常州普天仪器制造有限公司;LT3002E 型电子天平 常熟市天量仪器有限公司;FA2104B 型电子分析天平 上海越平科学仪器有限公司;UV-7504 型分光光度计

上海欣茂仪器有限公司;KQC-2B 型超声波提取机 济宁天华超声电子仪器有限公司;BCD-301DHN 型电冰箱 上海双鹿上菱企业集团有限公司;JW-2019HR 型台式冷冻离心机 安徽嘉文仪器装备有限公司;ZH-57 型手动挤压式压粉器 广东冀华强;FW100 型粉碎机 天津泰斯特仪器有限公司;D8-Adrance X-射线能谱仪 德国 Bruker 公司;热电 Nicolet 6700 型红外光谱仪 美国赛默飞世尔科技公司;TMS-Pro 型物料分析仪 北京盈盛恒泰科技有限公司;NOVA NANOSEM 电子扫描显微镜 美国 FEI 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 粉条的制作 分别称取 5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 g 玉米抗性淀粉(水分含量 12%)和红薯抗性淀粉(水分含量 14%),依次与 80.0、77.5、75.0、72.5、70.0 g 红薯淀粉(水分含量 12%)置于 1 L 烧杯中,混匀;准确量取 85 mL 纯净水倒入混合淀粉中,充分混合成淀粉匀浆;将烧杯置于 80 °C 水浴锅中加热,持续搅拌 3.5 min 使其糊化均匀后倒入不锈钢盆中,准确称取 15 g 红薯淀粉,加入到糊化后的淀粉浆中,稍冷却后和成面团;将和好的面团放入手动粉条挤压器里挤压出条(应一次性挤压出条,否则易会对粉条造成机械损伤,影响测定结果),至沸水锅中煮制 3 min,捞出后将粉条置于装有冷水的不锈钢盆中冷却约 15 min 后,将粉条晾晒在粉条架上自然晾晒 24 h,粉条呈自然收缩,质地发硬后放入保鲜袋,4 °C 保存待检,分别制备得抗性淀粉添加量为 5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 g/100 g 的红薯粉条^[9]。对照组样品制作工艺中的抗性淀粉用红薯淀粉代替,其他条件相同。

1.2.2 断条率的测定 参照 Lei 等^[10]的方法并修改,选用粗细均匀、无损伤的 10 根 15 cm 长粉条,置于沸水中,保持沸腾煮制 30 min,轻轻捞出并过凉水后数断条数,按照公式(1)计算断条率,重复 3 次。

$$\text{断条率}(\%) = \frac{N_s}{N} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中, N_s -断条总根数; N -粉条总根数。

1.2.3 质构特性的测定 筛选粗细均匀且无损伤的粉条 10 根放入沸水中,保持沸腾煮制 5 min 后捞出,放入冷水中冷却 3 min,用纱布吸干表面多余水分后,用保鲜膜保存待检;测定时,用剪刀将粉条裁成 8 cm 的小段后置于质构仪载物台上,每次测 3 根,采用 TPA(Texture Profile Analysis)模式,选用的探头型号 P_{50} ,触发力 0.5 N,下压比例 60 %,测前速度

60 mm/min, 测定速度 30 mm/min^[11], 测定指标包括硬度、弹性、内聚性和咀嚼性, 每个样品测 3 次。

1.2.4 感官评价 请 5 位食品专业学生在正常室温条件和光线下对粉条样品进行感官评价, 满分 100 分, 以平均分作为结果分析依据。评价标准参考 GB/T 23587-2009《粉条》制定, 见表 1。

1.2.5 X 射线衍射分析 将待测粉条烘干后用粉碎机粉碎, 过 100 目筛后将样品粉末均匀平整铺在样品盘上, 注意样品要与样品盘边缘平齐, 样品边缘擦拭整洁, 采用 X 射线衍射仪进行彻底, 具体测定参数为: 管压 40 kV, 管流 40 mA, 扫描步长 0.02°, 扫描范围 5°~50°^[12]。

1.2.6 红外光谱分析 参考 Wang 等^[13] 方法并稍作改动。样品经烘干、粉碎后过 100 目筛, 密封保存待测。测定时, 在红外光灯照射下, 向玛瑙研钵中加入样品与溴化钾, 样品与溴化钾比例为 1:100; 持续混合研磨 1 min 至均匀后用压片机压成薄片, 立即放入红外光谱仪中, 在波长为 0~4000 cm⁻¹ 下测定。

1.2.7 微观结构观察 将样品粉条烘干后, 剪成约 1 cm 长度, 将粉条样品横截面向上依次整齐排列在样品台上固定, 喷金镀膜处理 30 s 后, 使用扫描电子显微镜进行观察; 具体测定参数为: 加速电压 10.00 kV, 工作距离 11.80 mm, 放大倍数 1000。

1.2.8 体外消化性能测定 将粉条晾干至水分含量低于 15%, 粉碎、密封保存备用。试剂的配制: 3,5-二硝基水杨酸溶液: 氢氧化钠 262 mL(准确称量氢氧化钠 21 g, 溶解并定容至 500 mL)、酒石酸钾钠 182 g 加入热水充分溶解, 分别加入 3,5-二硝基水杨酸 6.3 g, 苯酚 5 g、偏重亚硫酸钾 5 g, 振荡均匀后加蒸馏水定容至 1000 mL 的棕色容量瓶内, 避光保存, 3~7 d 后使用; pH5.2 醋酸钠缓冲溶液: 0.30 mol/L 醋酸溶液(5.72 mL 冰醋酸用蒸馏水定容至 1000 mL 的

容量瓶内)210 mL 与 0.20 mol/L 醋酸钠溶液(9.46 g 乙酸钠用蒸馏水定容至 500 mL 的容量瓶内)790 mL 混合均匀; 0.40 mol/L 氢氧化钠溶液: 称取 16 g 氢氧化钠用蒸馏水定容至 1000 mL 的容量瓶内; 混合酶液: α-淀粉酶 170 U/mL 和淀粉葡萄糖苷酶 21 U/mL 混合均匀^[14]。

样品测定: 准确称取 10 mg 样品粉末和 8 mL pH5.2 的醋酸钠缓冲液混合于 50 mL 的离心管中振荡均匀, 置于沸水锅中 100 °C 煮沸 20 min 后, 流水冷却至 37 °C 备用; 将胃蛋白酶液与混合酶液放入 37 °C 水浴锅中平衡温度, 随后向冷却的样品中加入 1 mL 的胃蛋白酶液(2500 U/mL), 在 37 °C 水浴振荡 20 min(120 r/min)后加入 1 mL 37 °C 混合酶液, 在 37 °C 下水浴振荡 150 min(120 r/min), 分别在 20、60、120、150 min 时取 1 mL 水解液和 4 mL 的 0.40 mol/L 的氢氧化钠溶液置于 15 mL 离心管中混合均匀, 然后以 4000 r/min 下离心 20 min, 取 1 mL 上清液于 25 mL 螺口试管中, 加入 3,5-二硝基水杨酸试剂, 沸水浴 5 min 后流水迅速冷却, 蒸馏水定容至 25 mL 刻度处, 于波长 560 nm 处测定吸光值, 同时取 1 mL 蒸馏水作为空白对照, 绘制标准曲线, 计算葡萄糖在 0、20、60、120、150 min 含量 G₀、G₂₀、G₆₀、G₁₂₀、G₁₅₀^[15]。按照公式(2)计算淀粉的消化速率。

$$\text{消化率}(\%) = \frac{G_x}{m} \times 100$$

式 (2)

式中, G_x 分别为 0、20、60、120、150 min 时葡萄糖含量, mg/mL; m 为样品质量, g。

1.3 数据处理

实验记录数据为 3 次平行实验取得的平均值, 并采用 SPSS26 和 Excel 进行数据统计与分析, 主要对数据进行单因素方差分析法, 数据表示为平均

表 1 粉条感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for SNs

项目	评价指标	评分标准	分值(分)
煮熟前	组织状态(20分)	丝条粗细均匀、无并丝, 弹性良好、	16~20
		丝条粗细均匀、有个别并丝、弹性适中较好	8~15
		丝条大多不均匀、有多个并丝、弹性较差、易断	0~7
	色泽(20分)	色泽明亮鲜艳、有正常的颜色	16~20
		色泽良好、颜色较均匀、	8~15
		色泽暗淡不均匀、品相比较差	0~7
煮熟后	气味(20分)	有粉条正常的香味、无异味、	16~20
		粉条正常的香味不明显、无异味	8~15
		粉条有异味	0~7
	滋味(20分)	口感具有弹性、滋味好、风味优	16~20
		口感良好、滋味平淡、无风味特色	8~15
		口感差、滋味粗糙、有异味	0~7
	杂质(20分)	无肉眼可见杂质	16~20
		无明显杂质	8~15
		有较多杂质	0~7

值±标准误差。使用 Origin2018 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同添加量下两种抗性淀粉对粉条断条率的影响

断条率大小可直接反应出粉条的机械特性, 断条率越低, 表明粉条组织状态越好, 耐煮性越好, 反之则越差。不同添加量下两种抗性淀粉对粉条断条率的影响结果见图 1。

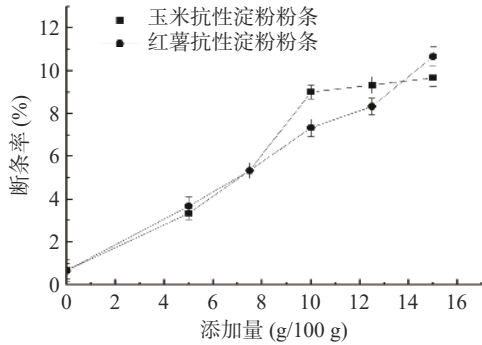


图 1 抗性淀粉对粉条断条率的影响
Fig.1 Effects of adding amounts of RS on the breakage rate of SNs

由图 1 可知, 两种抗性淀粉粉条断条率均随添加量的增大而增大, 这是因为抗性淀粉与普通红薯淀粉相比直链淀粉含量大, 抗性淀粉含量越高, 会降低糊化淀粉分子之间的结合力, 导致粉条断条率增加^[16]。红薯抗性淀粉粉条断条率在抗性淀粉添加量大于 12.0 g/100 g 后, 断条率急剧增加, 而玉米抗性淀粉粉条断条率曲线在抗性淀粉添加量大于 10.0 g/100 g 后, 逐渐变得平缓, 断条率的增加量较小, 这可能与玉米淀粉本身粘度较低, 内部结构结合不紧密有关。综合考虑抗性淀粉添加对粉条蒸煮性能的影响, 两种抗性淀粉添加量均应低于 10.0 g/100 g 为宜。

2.2 不同添加量下两种抗性淀粉对粉条质构特性的影响

由表 2 可知, 随着两种抗性淀粉添加量的增大,

粉条的硬度和咀嚼性均显著下降($P<0.05$)。这与董志雄等^[17]研究抗性淀粉对米线硬度的影响结果一致, 可能是由于抗性淀粉中短直链淀粉含量较高, 分子间作用力降低, 使粉条三维网络结构强度降低所致^[18]。红薯抗性淀粉添加量的升高对粉条内聚性的影响显著($P<0.05$), 表现为明显上升趋势, 对弹性影响较小; 玉米抗性淀粉添加量的升高对粉条内聚性和弹性均无显著影响($P>0.05$), 而且, 除玉米抗性淀粉添加量水平为 15.0 g/100 g 所得实验组以外, 其他玉米抗性淀粉粉条实验组弹性均显著低于对照组($P<0.05$), 这可能与玉米淀粉中直链淀粉含量、分子链大小及排列有关^[19]。总体来看, 玉米抗性淀粉粉条随抗性淀粉添加量升高所引起的质构特性变化较红薯抗性淀粉粉条小。

2.3 添加抗性淀粉对粉条感官品质的影响

对抗性淀粉粉条的组织状态、色泽、滋味、气味和杂质五个方面进行评定, 结果见图 2。从雷达图面积大小可以看出, 抗性淀粉粉条感官品质均较对照组粉条低, 其中抗性淀粉粉条在气味、滋味和色泽三个方面均较对照组粉条差, 而在组织状态和杂质两个方面, 两种抗性淀粉具有优于对照组的实验组水平^[20]。从可接受角度考虑, 红薯抗性淀粉粉条在组织状态、气味、滋味、色泽及杂质的较优添加水平分别为 5.0、10.0、5.0、12.5、12.5 g/100 g, 综合较优添加水平为 5.0 g/100 g; 对于玉米抗性淀粉粉条, 除对组织状态指标在 5.0 g/100 g 和 10.0 g/100 g 具有同等效果外, 其他四个指标的较优添加水平均为 5.0 g/100 g, 因此综合较优水平为 5.0 g/100 g。两种抗性淀粉粉条的色泽和杂质呈现不规则变化, 原因可能与熟化和冷却时粉条受热不均匀而产生不均匀的气泡有关, 肉眼观察下表现为不同大小和分布的白点。

2.4 抗性淀粉粉条 X-射线衍射结果分析

由图 3 可知, 不同抗性淀粉粉条在衍射角区间的衍射峰并没有明显差异, 均在 15°~20°时出现衍射峰。对照组粉条和玉米抗性淀粉粉条在 10°~15°之

表 2 抗性淀粉对粉条质构特性的影响

Table 2 Effects of adding amounts of RS on the texture characteristics of SNs

样品	添加量(g/100 g)	硬度(N)	内聚性	弹性	咀嚼性
对照组	0.0	52.53±0.32 ^{ab}	0.54±0.00 ^{da}	1.40±0.06 ^{ab}	52.97±1.23 ^{aA}
	5.0	47.83±0.43 ^b	0.53±0.01 ^d	1.20±0.01 ^c	40.87±0.92 ^b
	7.5	43.50±0.17 ^c	0.55±0.00 ^{cd}	1.24±0.01 ^{bc}	30.53±0.26 ^c
红薯抗性淀粉粉条	10.0	40.63±0.27 ^d	0.57±0.01 ^c	1.26±0.01 ^{bc}	25.74±0.18 ^d
	12.5	34.77±0.18 ^e	0.61±0.01 ^b	1.28±0.01 ^{bc}	20.97±0.12 ^e
	15.0	30.77±0.20 ^f	0.65±0.01 ^a	1.30±0.00 ^b	19.17±0.60 ^e
	5.0	56.67±0.73 ^A	0.54±0.00 ^A	1.24±0.00 ^C	45.56±0.02 ^B
	7.5	53.13±0.20 ^B	0.54±0.00 ^A	1.22±0.00 ^C	40.62±0.73 ^C
玉米抗性淀粉粉条	10.0	51.47±0.38 ^B	0.54±0.01 ^A	1.21±0.00 ^C	37.66±0.11 ^D
	12.5	48.63±0.54 ^C	0.53±0.01 ^A	1.21±0.01 ^C	35.27±0.52 ^E
	15.0	44.47±1.19 ^D	0.53±0.01 ^A	1.94±0.02 ^A	31.37±0.47 ^F

注: 不同小写字母上标表示添加红薯抗性淀粉之间具有显著行差异($P<0.05$); 不同大写字母上标表示添加玉米抗性淀粉之间具有显著行差异($P<0.05$); 相同字母上标表示差异不显著($P>0.05$),

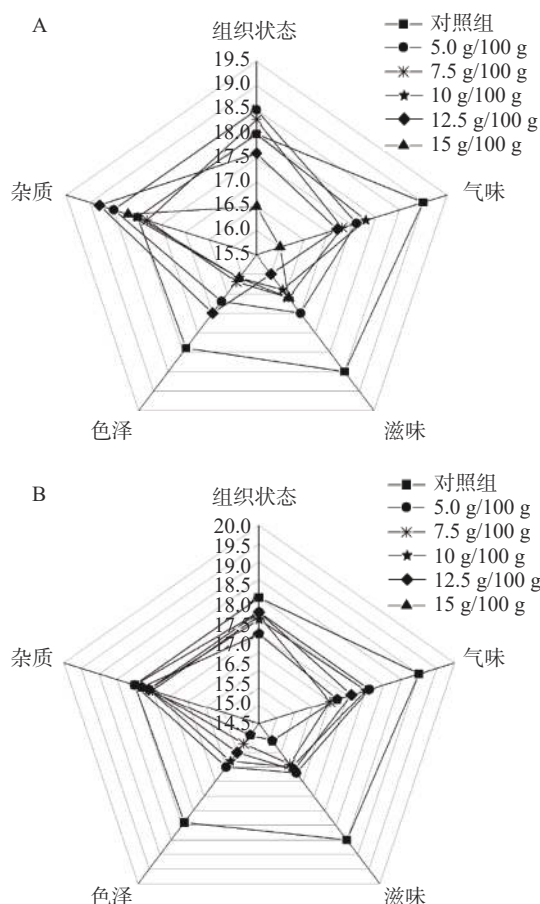


图2 添加抗性淀粉对粉条感官品质的影响

Fig.2 Effects of adding amounts of RS on the sensory quality of SNs

注: A.红薯抗性淀粉粉条; B.玉米抗性淀粉粉条。

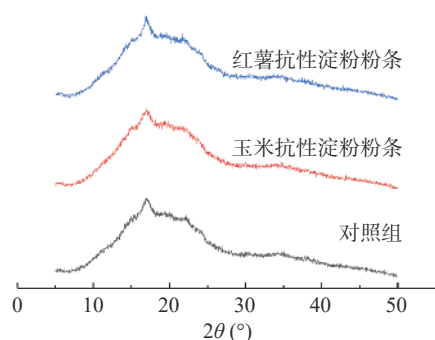


图3 抗性淀粉粉条 X-射线衍射图

Fig.3 X-ray diffraction curves of RSNs

间无明显的衍射峰,而红薯抗性淀粉粉条在此区间有较小衍射峰。相比于对照组粉条和玉米抗性淀粉粉条,红薯抗性淀粉粉条在 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间的衍射峰更多且密,在 17° 处的最大衍射峰更加尖锐,表现出更高的结晶度^[21]。

2.5 抗性淀粉粉条傅立叶红外光谱结果分析

傅里叶红外光谱是利用红外光谱技术测定物质的吸收能力,根据红外光谱吸收峰位置、形状以及强度变化可以分析官能团的伸缩和弯曲振动,描述淀粉分子短程有序性^[22]。图4为红薯抗性淀粉和玉米抗性淀粉粉条的傅立叶红外光谱图。空白粉条在波数

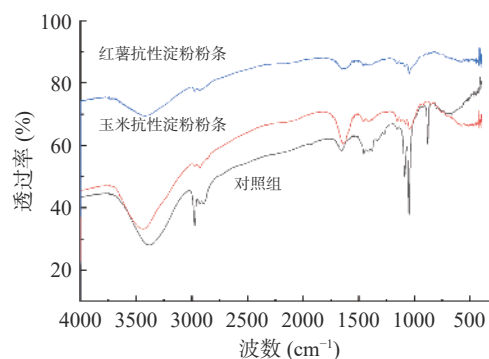


图4 抗性淀粉粉条傅立叶红外光谱图

Fig.4 Infrared spectroscopy of RSNs

为 $750\sim 1000\text{ cm}^{-1}$ (D-吡喃葡萄糖的 I、 α 和 III 型吸收带) 处和 3000 cm^{-1} (C-CH₂-C 伸缩振动吸收峰) 处出现明显吸收峰,在波数为 $1000\sim 1250\text{ cm}^{-1}$ (C-O-C 伸缩振动吸收峰) 处出现最大吸收峰,而两种抗性淀粉粉条在此处的吸收峰强度明显减弱,其中在吸收峰在波数 $750\sim 1750\text{ cm}^{-1}$ 之间特征峰有差异,说明样品内基团有较大改变。表明抗性淀粉粉条中直链淀粉和支链淀粉所组成的结晶区和无定形区半晶态较对照组粉条出现明显改变^[23]。

2.6 粉条微观结构的观察

粉条的微观结构扫描电镜图如图5所示,在电子显微镜 1000 倍下抗性淀粉显示为小颗粒状,粉条表面的颗粒越多,则说明粉条中抗性淀粉含量就越多,质地越粗糙,分子形态完整,抗消化性能越高。对照组粉条(图5E)表面孔洞较密集,无大孔洞,而两种抗性淀粉粉条均表现为孔洞直径增加,数量增多。玉米抗性淀粉粉条的淀粉颗粒较红薯抗性淀粉粉条更多。随着抗性淀粉添加量的升高,两种抗性淀粉粉条均表现为裂缝、孔洞明显增加、结果更加松散的趋势,玉米抗性淀粉粉条还表现为淀粉结晶颗粒数量增加,反应在蒸煮过程中更易发生物质流失,且断条率更高。同时,高结晶度和淀粉颗粒占比将有效减缓粉条的消化速度和消化率,延缓血糖升高速度,延长为机体功能的时间,从而降低饥饿感^[24]。

2.7 添加抗性淀粉对粉条体外消化性能的影响

不同添加量的玉米抗性淀粉粉条与红薯抗性淀粉粉条的体外淀粉消化性能结果如图6。由图6可以看出,空白红薯淀粉粉条在 60~120 min 的消化时间内,消化速率变化较快,而抗性淀粉粉条的消化速率 120~150 min 之间的消化速率变化较快,原因是抗性淀粉属于慢消化淀粉,但整体消化性能随时间的增加不断增高,2 h 后可达结肠并被结肠中的微生物利用而发酵后被消化吸收。对比对照组粉条,两种抗性淀粉粉条消化率均有所降低,说明添加抗性淀粉会明显降低粉条的消化速率和水解率,这与抗性淀粉具有较强的葡萄糖吸附能力及淀粉酶抑制能力等功能特性有关^[25]。研究表明,抗性淀粉中的直链淀粉和脂肪很容易形成复合物,对酶具有更强的抵抗力,从而

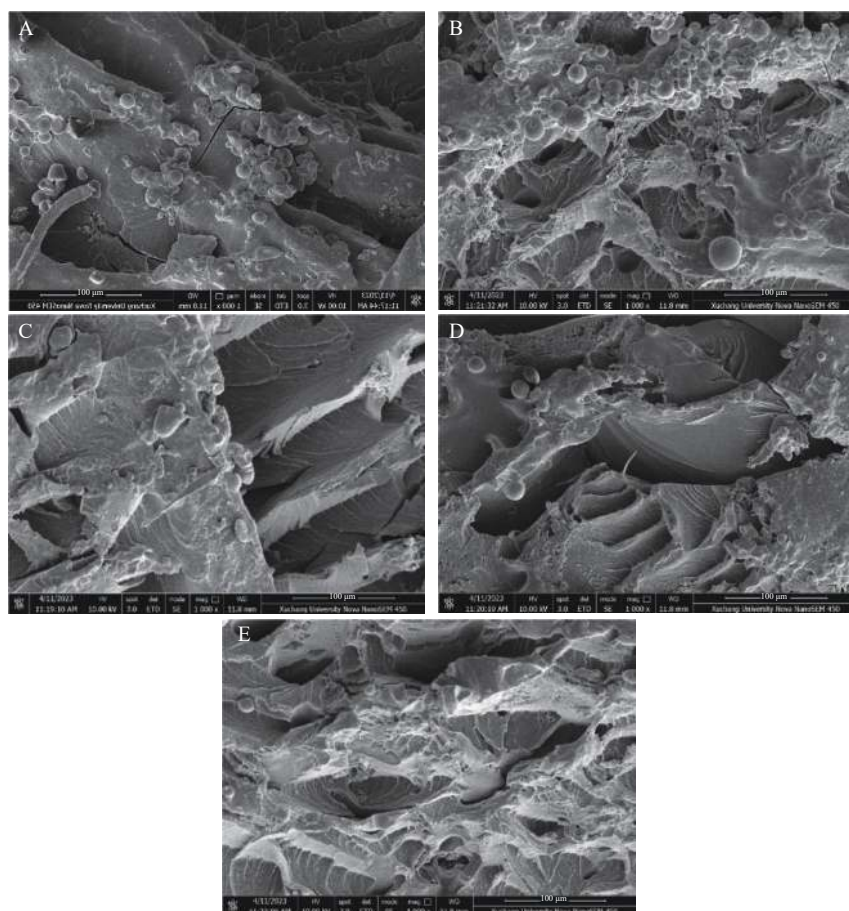


图 5 抗性淀粉粉条的扫描电镜图片

Fig.5 Scanning electron microscopy images of RSNs

注: A、B: 玉米抗性淀粉添加量分别为 5.0、10.0 g/100 g 的粉条; C、D: 红薯抗性淀粉添加量分别为 5.0、10.0 g/100 g 的粉条; E: 对照组。

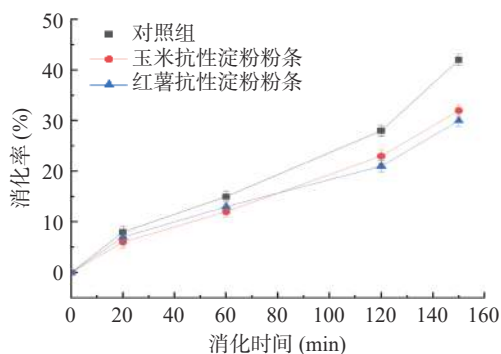


图 6 抗性淀粉粉条的体外消化性能

Fig.6 Digestibility of RSNs *in vitro*

阻碍淀粉的消化^[26-27]。在 0~80 min 期间玉米抗性淀粉粉条的消化速率低于红薯抗性淀粉粉条的消化速率,这可能由于红薯淀粉本身的吸水性优于玉米淀粉,导致淀粉的水解率相对较高,消化速率也随之增加。80~150 min 期间红薯抗性淀粉比玉米抗性淀粉消化低,原因为红薯抗性淀粉在小肠内被水解利用,而玉米抗性淀粉因为吸水性相对较差,导致消化时间延长^[28]。

3 结论

在红薯粉条中分别添加红薯抗性淀粉和玉米抗性淀粉,会引起粉条断条率、质构指标、感官评分等

指标的改变,并引起微观结构和淀粉消化率的变化。随着两种抗性淀粉添加量的升高,粉条硬度和咀嚼性都下降;红薯抗性淀粉添加量的升高能引起粉条内聚性的上升,而对弹性影响仅在添加量增加幅度达 10 g/100 g 方可呈现;玉米抗性淀粉添加量的升高对粉条内聚性和弹性均无明显影响;两种抗性淀粉粉条的结晶度和断条率均随添加量增加而增加;扫描电子显微镜观察发现粉条截面上的裂缝及孔洞明显增加,结构更为松散;经感官评定确定两种抗性淀粉的适宜添加量均为 5.0 g/100 g;经体外消化 2 h,红薯抗性淀粉粉条和玉米抗性淀粉粉条消化率分别为 20.2% 和 23.3%,而空白组消化率为 27.8%,表明两种抗性淀粉粉条具备良好的抗消化性能。从对两种抗性淀粉粉条综合品质测定及表征结果来看,抗性淀粉粉条的生产具备可行性和良好的市场前景。

© The Author(s) 2024. 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] 胡珍珍,郝宗山,孟妍,等. 抗性淀粉的制备、功效及应用的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(1): 30-35. [HU Z Z, HAO

- Z S, MENG Y, et al. Preparation, efficacy and application of resistant starch[J]. *Food and Nutrition in China*, 2021, 27(1): 30–35.]
- [2] 张婧婷. 抗性淀粉的类型及其制备技术研究进展[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(6): 26–33. [ZHANG J T. Research progress on the types and preparation techniques of resistant starch[J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2021, 35(6): 26–33.]
- [3] GARCIA-VALLE D E, BELLO-PEREZ L A, AGAMA-ACEVEDO E, et al. Effect of the preparation method on structural and *in vitro* digestibility properties of type II resistant starch-enriched wheat semolina pasta[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022(106): 106.]
- [4] KRAITHONG S, WANG S, JUNEJO S A, et al. Type 1 resistant starch: Nutritional properties and industry applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022(4): 125.]
- [5] 费洪立, 李志江, 阮长青, 等. 抗性淀粉的生理功能及其在食品中的应用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 425–432. [FEI H L, LI Z J, RUAN C Q, et al. Physiological function of resistant starch and its application in food[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(18): 425–432.]
- [6] 尚晓姪, 高群玉, 王捷, 等. 抗性淀粉体外消化模拟的研究[J]. 食品工业科技, 2007, 28(5): 218–220. [SHANG X Y, GAO Q Y, WANG J, et al. Study on *in vitro* digestion simulation of resistant starch[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007, 28(5): 218–220.]
- [7] 任泽明, 马凡怡. 抗性淀粉的理化性质、生物活性及应用研究进展[J]. 化学研究, 2022, 33(4): 355–360. [REN Z Y, MA F Y. Research progress on physicochemical properties, bioactivities and applications of resistant starches[J]. *Chemical Research*, 2022, 33(4): 355–360.]
- [8] LI C L, DHITAL S, GIDLEY M J. High-amylose wheat tortillas with reduced *in vitro* digestion and enhanced resistant starch content[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137, 108321.]
- [9] 郭卫芸, 陈振毫, 高雪丽, 等. 茶多酚红薯粉条的研制及其抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 156–161. [GUO W Y, CHEN Z H, GAO X L, et al. Preparation and antioxidant activity evaluation of tea polyphenol sweet potato starch noodles[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(13): 156–161.]
- [10] LEI W Y, WU W G, LIAO L Y, et al. Quality evaluation and raw material selection of fresh wet rice noodles[J]. *Food Science*, 2020, 41(1): 74–79.]
- [11] 赵俊, 黄永春, 张昆明, 等. 壳聚糖对米粉条质构特性的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(2): 46–49, 54. [ZHAO J, HUANG Y C, ZHANG K M, et al. Effect of chitosan on the texture properties of rice flour noodles[J]. *China Condiment*, 2022, 47(2): 46–49, 54.]
- [12] 邹金浩, 李燕, 苏小军, 等. 薯类粉条中与淀粉相关的结构性质研究[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(3): 26–30. [ZOU J H, LI Y, SU X J, et al. Starch-related structure properties of different root crop starch noodle[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2020, 28(3): 26–30.]
- [13] WANG H W, XIAO N Y, WANG X T, et al. Effect of pregelatinized starch on the characteristics, microstructures, and quality attributes of glutinous rice flour and dumplings[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283(1): 248–256.]
- [14] 马丽苹, 焦昆鹏, 罗磊, 等. 怀山药抗性淀粉理化性质及体外消化性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 41–46. [MA L P, JIAO K P, LUO L, et al. Study on the physicochemical properties and digestibility of the resistant starch from *Dioscorea oppositifolia* Thunb. cv. Huaqing[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(11): 41–46.]
- [15] 程冰, 张乐乐, 安艳霞, 等. 马铃薯抗性淀粉结构特征及体外消化特性的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 6975–6981. [CHENG B, ZHANG L L, AN Y X, et al. Research on structural characteristics and *in vitro* digestibility of potato resistant starch[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(17): 6975–6981.]
- [16] SHARMA P, GOUDAR G, CHANDRAGIRI A K, et al. Assessment of diversity in anti-nutrient profile, resistant starch, minerals and carbohydrate components in different ricebean (*Vigna umbellata*) accessions[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405(Pt A): 134835.]
- [17] 董志雄, 郑恺, 丁文平, 等. RS2 型抗性淀粉对米线品质及消化特性的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(6): 131–138. [DONG Z X, ZHENG K, DING W P, et al. Effects of RS2 resistant starch on the quality and digestive characteristics of rice noodles[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(6): 131–138.]
- [18] ADRIANNA B, SYLWIA S, AMIN M, et al. Health benefits of resistant starch: A review of the literature[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022(93): 105094.]
- [19] 何丹. 蚕豆、高直链玉米淀粉和亲水胶体对马铃薯粉条品质的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2023. [HE D. Effect of faba beans, high amylose corn starch and hydrocolloids on the quality of potato vermicelli[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2023.]
- [20] 李光磊, 李新华. 抗性淀粉应用特性研究[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(6): 78–81. [LI G L, LI X H. Study on the application characteristics of resistant starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2007, 22(6): 78–81.]
- [21] 刘霞, 黄雅萍, 卢旭, 等. 抗性淀粉的结构性质与功能关系研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 279–286. [LIU X, HUANG Y P, LU X, et al. Advances in structural properties and its correlation with physiological functions of resistant starch[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(18): 279–286.]
- [22] DANILOSKI D, MCCARTHY N A, OCALLAGHAN T F, et al. Authentication of β -casein milk phenotypes using FTIR spectroscopy[J]. *International Dairy Journal*, 2022, 129: 105350.]
- [23] 满建民, 蔡灿辉, 严秋香, 等. 红外光谱技术在淀粉粒有序结构分析中的应用[J]. 作物学报, 2012, 38(3): 505–513. [MAN J M, CAI C H, YAN Q X, et al. Applications of infrared spectroscopy in the analysis of ordered structure of starch grain[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(3): 505–513.]
- [24] 魏强, 雨欣, 曹少攀, 等. 沙米粉对大米粉及其粉条品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 86–94. [WEI Q, YU X, CAO S P, et al. Effect of *Agriophyllum squarrosum* flour on the quality of rice flour and rice noodles[J]. *Food Science*, 2022, 43(20): 86–94.]
- [25] DARTOIS A, SINGH J, AUR L, et al. Influence of guar gum on the *in vitro* starch digestibility-rheological and microstructural characteristics[J]. *Food Biophysics*, 2010(5): 149–160.]
- [26] DING Y X, HEN J J, LIN Q Y, et al. Effects of endogenous proteins and lipids on structural, thermal, rheological, and pasting properties and digestibility of adlay seed (*Coix lacryma-jobi* L.) starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106254.]
- [27] MEYNIE A, GOUX A, ATKINSON F, et al. Postprandial glycaemic response: How is it influenced by characteristics of cereal products?[J]. *British Journal of Nutrition*, 2015, 113(12): 1931–1939.]
- [28] 程冰, 林顺顺, 李梦琴, 等. 2 种抗性淀粉的结构特征及体外消化性研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(2): 81–88, 96. [CHENG B, LIN S S, LI M Q, et al. Structural characteristics and *in vitro* digestibility of two resistant starches[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(2): 81–88, 96.]