

黄菊青, 李伟斌, 王琦, 等. 添加武夷岩茶对米粉丝品质、体外消化特性和抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 101-109. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080113

HUANG Juqing, LI Weibin, WANG Qi, et al. Effects of Adding Wuyi Rock Tea on Quality, *in vitro* Digestive Characteristics and Antioxidant Activity of Rice Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 101-109. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080113

· 研究与探讨 ·

添加武夷岩茶对米粉丝品质、体外消化特性和抗氧化活性的影响

黄菊青, 李伟斌, 王琦, 官雪芳, 林斌*

(福建省农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部亚热带特色果蔬菌加工重点实验室, 福建省农产品(食品)加工重点实验室, 福建福州 350003)

摘要: 为开发具有抗消化性和抗氧化活性的功能米粉制品, 研究添加武夷岩茶对米粉丝品质、体外消化特性和抗氧化活性的影响。采用质构仪和感官评价法测定米粉丝的质构和感官品质, 采用 GC-MS 法检测风味成分, 采用 FRAP 法、DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除法测定抗氧化活性, 采用体外模拟消化法检测米粉丝的体外消化特性。结果表明, 与未添加武夷岩茶的米粉丝(对照组)相比, 添加 2.9%~7.0% 武夷岩茶的米粉丝断条率无明显变化 ($P>0.05$), 添加 8.3% 武夷岩茶的米粉丝断条率显著增加 ($P<0.05$); 添加 2.9%~8.3% 武夷岩茶的米粉丝硬度、粘聚性、胶着性、咀嚼性和回复性显著低于对照组 ($P<0.05$), 而气味和食味分值显著高于对照组 ($P<0.05$); 添加 5.7% 武夷岩茶的米粉丝保留了岩茶的主要香气物质(香叶醇、2-苯乙醇、苯甲醛、(E)-2-己烯醛), 且其米粉丝弹性显著高于对照组和其余岩茶组 ($P<0.05$)。与对照组相比, 添加 5.7% 武夷岩茶的米粉丝中快消化淀粉(RDS)比例下降 8.69%, 抗性淀粉(RS)比例增加 14.34%, 对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除能力显著增强 ($P<0.05$), 总抗氧化能力是对照组的 7.48 倍。在米粉丝中添加武夷岩茶能够赋予米粉丝独特风味, 显著增强米粉丝的抗消化性和抗氧化活性, 提高了米粉丝的营养保健价值。

关键词: 武夷岩茶, 米粉丝, 品质, 体外消化特性, 抗氧化活性

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)10-0101-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080113



本文网刊:

Effects of Adding Wuyi Rock Tea on Quality, *in vitro* Digestive Characteristics and Antioxidant Activity of Rice Noodles

HUANG Juqing, LI Weibin, WANG Qi, GUAN Xuefang, LIN Bin*

(Institute of Food Science and Technology, Fujian Academy of Agricultural Science, Key Laboratory of Processing of Subtropical Characteristic Fruits, Vegetables and Edible Fungi, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Fujian Key Laboratory of Agricultural Product (Food) Processing, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In order to develop functional rice flour products with anti-digestive and antioxidant activities, the effects of adding Wuyi rock tea (WRT) on the quality, *in vitro* digestive characteristics and antioxidant activity of rice noodles were studied. The texture and sensory quality of rice noodles were determined by texture analyzer and sensory evaluation method, respectively. The flavor components were characterized by GC-MS, and the antioxidant activity was assessed by FRAP, DPPH and ABTS⁺ assays. The digestive characteristics of rice noodles were detected by the *in vitro* simulated digestion method. The results showed that compared to the control rice noodles, the breaking rate of rice noodles added with 2.9%~7.0% WRT was not significantly changed ($P>0.05$), while the breaking rate of rice noodles added with 8.3%

收稿日期: 2023-08-15

基金项目: 福建省公益类科研院所专项项目 (No.2021R1032006); 福建省自然科学基金项目 (No.2022J01483); 福建省农业科学院自由探索科技创新项目 (ZYTS202223)。

作者简介: 黄菊青 (1986-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 功能食品的研究与开发, E-mail: jq_huang@zju.edu.cn。

* 通信作者: 林斌 (1964-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 茶叶食品的研究与开发, E-mail: linbin591@163.com。

WRT was significantly increased ($P<0.05$). Adding 2.9%~8.3% WRT could significantly lower the values of hardness, cohesiveness, gumminess, chewiness and resilience of rice noodles ($P<0.05$), but improve the smell and taste scores of rice noodles ($P<0.05$). The rice noodles added with 5.7% WRT had the highest springiness value among all the groups and reserved the main volatiles from rock tea (i.e. 2,6-Octadien-1-ol, (Z)-3,7-dimethyl, 2-phenylethanol, benzeneacetaldehyde, (E)-2-Hexenal). Meanwhile, it was found that adding 5.7% WRT could reduce the proportion of fast digestible starch of rice noodles by 8.69%, while increase the proportion of resistant starch by 14.34%. In addition, compared with the control noodles, the rice noodles added with 5.7% WRT had a considerably stronger ability to scavenge DPPH and ABTS⁺ free radicals ($P<0.05$), with a total antioxidant capacity of 7.48 times that of the control noodles. The results suggested that the addition of WRT provided rice noodles with a unique flavor, higher digestion resistibility as well as antioxidant activity, thus improving the nutritional and healthy properties of rice noodles.

Key words: Wuyi rock tea; rice noodle; quality; *in vitro* digestive characteristics; antioxidant activity

米粉是我国南方地区常见的主食类食品,食用人口达数亿之多,是市场规模最大的米制品^[1-2]。由于普通米粉的营养成分较为单一,缺少保健功能成分,已经不能满足人们对营养和保健的要求。近年来随着人们对慢性病预防意识的逐渐增强,消费者对健康营养食品的需求持续增加,具有独特风味的营养健康米粉产品在市场上越来越受到青睐。目前市场上备受广大消费者喜爱的两大类食品主要是抗氧化和降血糖功能食品^[3-5]。根据在体外模拟环境中消化速率的不同,淀粉可被分类为快消化淀粉(rapid digestible starch, RDS),慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)^[6]。普通米粉中一般含较高比例的RDS和较低比例的RS^[7-8],不大适用于血糖偏高的消费者食用。此外,普通米粉中也缺少抗氧化活性成分,几乎无法发挥抗氧化作用。因此,开发具有抗消化性和抗氧化活性的米粉产品符合消费者对食品的多功能需求。

武夷岩茶属于乌龙茶类,主产区在福建省武夷山市,因具有独特的“岩骨花香”的风味特征和抗过敏、降血糖、抗氧化等保健功效而受到消费者的喜爱^[9]。课题组前期研究表明,武夷岩茶水提取物在体外具有良好的抗炎活性和潜在的抗癌活性^[10-11]。武夷岩茶中的主要生物活性成分是茶多酚、茶黄素和茶多糖^[10-12]。研究表明,茶叶中的茶多酚、茶黄素和水溶性茶多糖这些成分不仅具有优异的抗氧化活性^[13],还能够与淀粉大分子发生络合作用,改变淀粉分子的结晶形态,进而影响淀粉凝胶的老化行为和消化性能,起到抗消化的作用^[14-15]。因此,在米粉加工过程中加入茶不仅能够提高米粉的抗氧化能力,还可以降低淀粉的体外消化率,起到延缓米粉消化的效果^[3,7]。Li等^[7]研究了添加抹茶粉对米粉条品质的影响,发现抹茶粉会增加米粉条的咀嚼性、抗氧化活性和抗消化性,并赋予米粉条独特的风味。然而,截至目前,尚未有研究涉及添加武夷岩茶对米粉制品品质的影响。

为此,本研究拟将武夷岩茶应用到米粉的加工中,研究武夷岩茶的添加对米粉食用品质、抗氧化活性和淀粉体外消化特性的影响,旨在为营养健康米粉制品的研发提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

“珍桂矮”早籼米(直链淀粉含量 21.2%±0.5%) 阳春市黎糊星豪米业有限公司;武夷肉桂岩茶 福建白塔山茶业有限公司,于2022年春季按照“开采面”标准采摘鲜叶,而后按照“萎凋、做青、杀青、揉捻、干燥、挑拣、走水焙”一系列制作工艺流程制成毛茶; α -淀粉酶(来自猪胰酶, A3176, 酶活力 10 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶(A3306, 酶活力 260 U/mg) 美国 Sigma-Aldrich 公司;葡萄糖氧化试剂盒(GOPOD) 苏州格锐思生物科技有限公司;总抗氧化能力检测试剂盒(FRAP法) 碧云天生物技术公司;DPPH检测试剂盒、ABTS检测试剂盒 南京建成生物工程研究所。

HS-60 自熟挤丝成型米粉机 曲阜市宏盛机械有限公司;NS810 分光测色仪 深圳市三恩驰科技有限公司;TA-XT. Express 物性分析仪 英国 Stable Micro Systems 公司;BS210S/BS224S 型电子分析天平 德国 Sartorius 公司;BMG CLARIO star 高通量微孔板紫外分光光度计 德国 BMG LABTECH 公司;TGL-10B 高速台式离心机 上海安亭科学仪器厂;DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱 上海新苗医疗器械制造有限公司;DK-S22 数显恒温水浴锅 福州新拓达公司;YF8-5 流水式水冷粉碎机 瑞安市永历制药机械有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 武夷岩茶茶汤的制备 分别称取 30、45、60、75 和 90 g 岩茶粉(含水量 3.6%),加入 1.34 kg 蒸馏水,于沸水中煮制 3 min 后,将茶汤冷却,用 100 目不锈钢滤网过滤,得滤液,用蒸馏水将滤液补足至 1.34 kg,获得茶粉添加量分别为大米粉和茶粉总质量的 2.9%、4.3%、5.7%、7.0% 和 8.3% 的武夷岩茶茶汤。

1.2.2 武夷岩茶米粉的制备 将陈化 14 个月的“珍桂矮”早籼米磨粉,过 100 目筛得大米粉。称取 1 kg 大米粉,加入 1.34 kg 如 1.2.1 所述的武夷岩茶茶汤,搅拌均匀后,倒入自熟挤丝成型米粉机(模具孔径 0.8 mm),获得武夷岩茶湿米粉,放 4 °C 老化

5 h 后, 于 37 °C 下烘干至水分含量为 12%~14%, 得武夷岩茶米粉。

1.2.3 蒸煮品质测定 断条率和蒸煮损失率参考王佳玉等^[16]的方法测定。复水时间和复水率参照任元元等^[17]的方法测定。

1.2.4 质构特性测定 参考 Bae 等^[18]的方法并做适当调整。取适量米粉放入碗中, 加入适量沸水, 加盖静置各自最佳的复水时间, 吹干表面水分, 待测。测定条件: 采用 P/36R 探头, 压缩比 85%, 测前速度 1 mm/s, 测试速度 0.17 mm/s, 测后速度 10 mm/s, 测试距离 20 mm, 触发力 20 g。每个试样做 6 次平行试验, 数据采用去除异常值后的平均值。

1.2.5 色差测定 采用色差计测定岩茶米粉的 L^* , a^* , b^* 和 C^* 值。每个试样平行测定 3 次。

1.2.6 感官评价 将武夷岩茶米粉分别放入沸水中煮至米粉白芯消失后捞出, 挑选 10 名食品专业人员(男性 5 名, 女性 5 名, 年龄 22~58 岁)品尝, 按照表 1 进行感官评价, 记录评分结果。

表 1 武夷岩茶米粉的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of rice noodles fortified with Wuyi rock tea

一级指标	二级指标	具体特性分值
气味 15 分	气味 15 分	有较浓郁的米香味或愉悦的茶香味: 13~15 分
		有淡淡的米香味或茶香味: 9~12 分
		无米香味或茶香味, 但无异味: 6~8 分
		无米香味或茶香味, 且有异味: 0~5 分
		白色或茶黄色, 且有明显光泽: 7~8 分
	色泽 8 分	颜色正常, 无异色: 4~6 分
		颜色暗淡, 有异色, 无光泽: 0~3 分
		米粉条结构紧密, 无断条、并条、碎粉: 8~9 分
		米粉条较易断条; 有少量并条或有少量碎粉: 5~7 分
		米粉条易断条; 有大量并条或有大量碎粉: 0~4 分
外观结构 25 分	结构完整性 9 分	米粉表皮光滑, 且米粉丝粗细均匀: 7~8 分
		米粉表皮较为光滑, 且米粉丝比较均匀: 4~6 分
	均匀度 8 分	米粉表皮粗糙, 且米粉丝粗细不均: 0~3 分
		爽滑黏性适中, 不黏牙不夹生: 10~12 分
质地特性 35 分	黏性 12 分	不黏牙不夹生: 7~9 分
		黏牙或有夹生现象: 0~6 分
		软硬适中: 11~13 分
	软硬度 13 分	略软或略硬: 7~10 分
		很软或很硬: 0~6 分
		有嚼劲: 8~10 分
筋道感 10 分	稍有嚼劲: 5~7 分	
	无嚼劲: 0~4 分	
	咀嚼时有较浓郁的米香味或愉悦的茶香味: 22~25 分	
食味 25 分	滋味 25 分	咀嚼时有淡淡的米香味或茶香味: 18~21 分
		咀嚼时无米香味或茶香味, 但无异味: 15~17 分
		咀嚼时无米香味或茶香味, 且有异味: 0~14 分

1.2.7 风味物质测定 参考 Fu 等^[3]的方法并做适当调整。称取 2 g 米粉(过 100 目筛)移入到 15 mL 萃取瓶中, 然后快速密封。将样品瓶置于固相微萃取装

置上, 于 60 °C 下水浴加热 30 min。将 SPME 萃取纤维头在 GC-MS 进样口于 250 °C 老化至无杂峰。将 SPME 萃取头通过瓶盖插入样品的顶空部分, 推出纤维头, 萃取头高于样品上表面约 1.0 cm, 顶空萃取 45 min; 抽回纤维头, 从样品瓶中拔出萃取头, 再将萃取头插入 GC-MS 进样口, 推出纤维头, 于 250 °C 解析 5 min, 进样分析。

GC 测定条件: HP-5MS 适应毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 40 °C 保持 3 min, 4 °C/min 升至 150 °C, 10 °C/min 升高至 250 °C, 保持 4 min; 载气(He)流速 1.2 mL/min, 压力 2.4 kPa, 进样量 0.5 μL, 分流比 10:1。

MS 测定条件: 电子轰击离子源, 电子能量 70 eV, 传输线温度 275 °C, 离子源温度 200 °C, 激活电压 1.5 V, 质量扫描范围 m/z 35~500。

1.2.8 体外消化特性测定 参考 Geng 等^[19]的方法并做适当调整。称取 α-淀粉酶 3 g, 加入 50 mL 离心管, 加入 20 mL 去离子水, 混合均匀, 放磁力搅拌器搅拌 10 min 后, 在 4 °C、10000 r/min 下离心 20 min。取 17 mL 上清液与 1 mL 淀粉葡萄糖苷酶混合, 得混合酶液。称取 0.1 g 米粉(过 100 目筛)于 50 mL 离心管, 加入 10 mL 乙酸盐缓冲溶液(0.1 mol/L, pH5.2), 盖紧盖子, 用涡旋振荡器混合均匀, 放入沸水浴加热 10 min。冷却到 37 °C, 加入 5 个玻璃珠(直径 0.4 cm), 再加入 3.0 mL 混合酶液。将样品放在 37 °C 水浴中连续摇动(200 r/min)孵育, 在第 0、20 和 120 min 时, 分别取出 0.1 mL 水解液放入 2 mL 离心管, 并立即与 0.9 mL 无水乙醇混合, 离心(4 °C、10000 r/min, 10 min), 收集上清液, 用 GOPOD 试剂盒检测葡萄糖含量。每个样品进行 3 次重复实验。根据下面公式计算 RDS、SDS 和 RS 的含量。

$$RDS(\%) = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{TS} \times 100$$

$$SDS(\%) = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS} \times 100$$

$$RS(\%) = \frac{(TS - (RDS + SDS))}{TS} \times 100$$

式中, G_0 、 G_{20} 和 G_{120} 分别为第 0、20 和 120 min 的葡萄糖含量; RDS 为快消化淀粉; SDS 为慢消化淀粉; RS 为抗性淀粉; TS 为总淀粉。

1.2.9 总酚含量测定 采用福林酚比色法测定。

1.2.10 体外抗氧化活性测定 采用 FRAP 法检测米粉的总抗氧化能力, 具体参照试剂盒说明书执行, 同时参照试剂盒说明书测定米粉对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除能力。

1.3 数据处理

所有数据均至少独立平行测定 3 次, 数据结果以平均值±标准差的形式表示。使用 Origin 9.0 软件

绘图,采用 SPSS 24.0 软件对试验数据进行统计学分析,通过独立样本 *t* 检验或方差分析中的 Duncan 比较法进行显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著, $P < 0.001$ 表示差异高度显著。

2 结果与分析

2.1 武夷岩茶米粉的蒸煮品质

对各组米粉样品的断条率和蒸煮损失率进行测定,其结果见表 2。与对照组相比,添加 2.9%~7.0% 岩茶的米粉断条率变化不显著 ($P > 0.05$); 当岩茶添加量为 8.3% 时,米粉的断条率显著增加 ($P < 0.05$)。这可能是由于茶叶中的茶多酚与淀粉分子相互作用,导致淀粉老化后形成的有序结构减少,从而减弱所形成的淀粉凝胶网络结构强度^[20]。与对照组相比,添加岩茶的米粉蒸煮损失率显著增加 ($P < 0.05$),但各组米粉的蒸煮损失率均低于 5.00%。岩茶导致米粉蒸煮损失率的增加可能主要与茶多酚减弱淀粉凝胶网络结构的强度有关,因米粉的凝胶强度越弱,其蒸煮损失就越大^[21]。

表 2 武夷岩茶米粉的蒸煮品质

Table 2 Cooking quality of rice noodles with Wuyi rock tea

样品	断条率(%)	蒸煮损失率(%)	复水率(%)	复水时间(min)
对照组	4.30±0.65 ^a	4.57±0.09 ^a	259.2±4.2 ^{bc}	168.7±4.8 ^{ab}
A1	4.65±0.33 ^a	4.73±0.05 ^b	234.0±7.8 ^a	166.7±5.0 ^a
A2	5.57±0.21 ^a	4.83±0.05 ^b	241.7±1.6 ^{ab}	178.0±1.6 ^b
A3	4.23±0.69 ^a	4.73±0.05 ^b	246.3±7.9 ^{ab}	170.7±5.9 ^{ab}
A4	5.00±0.73 ^a	4.83±0.05 ^b	267.0±15.0 ^c	171.0±1.6 ^{ab}
A5	7.37±0.88 ^b	4.77±0.05 ^b	292.0±3.6 ^d	176.7±2.1 ^b

注:同一列数值右上方不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); A1、A2、A3、A4、A5 分别表示添加 2.9%、4.3%、5.7%、7.0% 和 8.3% 岩茶的米粉,对照组为未添加武夷岩茶的米粉,表 3~表 4、图 1~图 2 同。

对各组米粉样品的复水率和复水时间进行测定,其结果见表 2。不同添加量岩茶对米粉复水率的影响存在差别。当岩茶添加量为 2.9%、4.3% 和

5.7% 时,米粉的复水率低于对照组,其中 2.9% 岩茶组与对照组相比有显著差异 ($P < 0.05$)。这可能是由于茶多酚中的羟基与淀粉分子的相互作用限制了淀粉的吸水和膨胀^[22],从而导致米粉复水率的下降。当岩茶添加量为 7.0% 时,米粉的复水率略高于对照组,但差异不显著 ($P > 0.05$),而当岩茶添加量为 8.3% 时,米粉的复水率显著高于对照 ($P < 0.05$)。这可能是由于高含量的茶多酚与淀粉分子中的直链淀粉螺旋结构和支链淀粉长侧链结构的相互作用,形成分子间与分子内氢键,抑制了淀粉凝胶的老化^[23],降低了淀粉凝胶的硬度,从而使淀粉吸水更多,复水率增加。该实验结果与 Li 等^[7]报道的结果一致。关于复水时间,各组米粉样品的复水时间均在 180 s 之内,A1 组与 A2、A5 组样品的复水时间存在显著差异 ($P < 0.05$),这可能是由于 A2 和 A5 组样品中的茶多酚等影响米粉淀粉的糊化,且抑制淀粉凝胶的老化,从而延长了米粉的复水时间^[21]。

2.2 武夷岩茶米粉的色差、质构和感官品质

对煮制后各组米粉的物性参数和感官品质进行测定,其结果见表 3。与对照组相比,各岩茶组米粉的 L^* 值(亮度)显著降低 ($P < 0.05$), a^* 值(红绿颜色), b^* 值(黄蓝颜色)和 C^* 值(饱和度)显著增加 ($P < 0.05$),并且随着岩茶添加量的增加, L^* 值呈逐渐降低的趋势, a^* 值(红绿颜色), b^* 值(黄蓝颜色)和 C^* 值(饱和度)整体呈逐渐增加的趋势,说明岩茶的添加使米粉的亮度降低,色泽逐渐往红黄色转变。

研究表明,在米粉的加工过程中,茶叶中的茶多酚可通过干预淀粉的糊化与老化来改变大米淀粉凝胶网络的强度,进而影响米粉的最终质构特性^[20]。硬度反映的是样品达到一定变形所必须的力,粘聚性反映了样品内部黏结的紧密程度和抵抗外界破坏的能力^[22]。表 3 结果显示,与对照组相比,各岩

表 3 武夷岩茶米粉的色差、质构和感官品质

Table 3 Color, texture and sensory quality of rice noodles with Wuyi rock tea

指标	对照组	A1	A2	A3	A4	A5	
色差	L^*	83.13±1.28 ^d	73.81±0.56 ^c	71.73±0.50 ^b	71.40±0.89 ^b	69.24±0.86 ^a	67.46±0.57 ^a
	a^*	0.58±0.08 ^a	2.45±0.05 ^b	2.69±0.12 ^c	2.92±0.08 ^d	3.26±0.03 ^e	3.29±0.03 ^e
	b^*	6.32±0.16 ^a	12.44±0.22 ^b	13.42±0.25 ^c	14.12±0.12 ^d	15.12±0.39 ^e	14.94±0.21 ^e
	C^*	6.35±0.16 ^a	12.68±0.21 ^b	13.69±0.26 ^c	14.42±0.11 ^d	15.46±0.38 ^e	15.30±0.2 ^e
质构	硬度(g)	5069.13±366.15 ^b	3110.77±318.34 ^a	2950.25±588.54 ^a	3502.28±623.41 ^a	2819.51±242.18 ^a	2598.25±438.79 ^a
	弹性	0.81±0.07 ^a	0.81±0.09 ^a	0.86±0.10 ^a	1.16±0.27 ^b	0.65±0.06 ^a	0.71±0.13 ^a
	粘聚性	0.75±0.04 ^b	0.58±0.05 ^a	0.59±0.03 ^a	0.63±0.02 ^a	0.61±0.02 ^a	0.64±0.03 ^a
	胶着性	3850.25±485.42 ^b	1817.62±310.43 ^a	1757.67±381.33 ^a	2199.82±328.47 ^a	1710.54±199.55 ^a	1649.19±251.05 ^a
	咀嚼性	3122.04±634.63 ^b	1452.80±116.04 ^a	1545.28±475.31 ^a	2614.26±873.64 ^b	1102.74±95.52 ^a	1139.49±46.69 ^a
	回复性	0.56±0.07 ^c	0.27±0.03 ^a	0.26±0.01 ^a	0.28±0.01 ^{ab}	0.35±0.01 ^b	0.36±0.03 ^b
	气味(分)	10.9±0.7 ^a	11.7±0.9 ^b	12.0±0.9 ^{bc}	12.6±0.8 ^c	12.3±0.8 ^{bc}	12.2±0.6 ^{bc}
感官评价	外观(分)	22.8±1.1 ^{ab}	22.1±0.7 ^{ab}	23.2±1.0 ^b	22.9±0.8 ^{ab}	21.9±1.3 ^a	21.8±1.5 ^a
	质地(分)	26.7±1.7 ^a	27.2±1.2 ^a	27.3±1.4 ^a	28.8±1.2 ^b	27.1±1.8 ^a	27.5±1.5 ^{ab}
	食味(分)	18.9±0.8 ^a	20.4±1.0 ^b	20.8±1.2 ^b	21.2±1.2 ^b	21.2±1.1 ^b	20.8±1.5 ^b
	总分	79.3±2.3 ^a	81.4±2.5 ^{ab}	83.3±1.6 ^{bc}	85.5±2.4 ^c	82.5±3.0 ^b	82.3±2.4 ^b

注:同一行数值右上方不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

茶组米粉丝的硬度和粘聚性均显著降低($P<0.05$), 这可能是由于茶多酚减弱了直链淀粉分子间的相互作用, 使淀粉分子形成有效交联点的数目和密度减小^[24], 从而降低了米粉丝的硬度和粘聚性。因胶着性与硬度和粘聚性呈正相关关系, 故各岩茶组米粉丝的胶着性也相应地较对照组低($P<0.05$)。在各岩茶组米粉丝中, A3 组米粉丝的弹性和咀嚼性最高, 说明 5.7% 添加量的岩茶对米粉丝的质构产生最为积极的影响。

与对照组相比, 各岩茶组米粉丝的气味和食味分值显著增加($P<0.05$), 外观和质地分值整体变化不明显, 5.7% 岩茶组米粉丝的质地分值显著高于对照组($P<0.05$)。这主要是由于 5.7% 岩茶组米粉丝的弹性高, 咀嚼性适中。各岩茶组米粉丝的感官总评分与对照组相比均显著增加($P<0.05$), 其中 5.7% 岩茶组米粉丝的感官总评分最高, 为 85.5 ± 2.4 。孟亚萍^[25]的研究显示, 当米粉丝的硬度为 3302~3394 g 时, 米粉丝的口感较佳。卿明义等^[22]研究发现, 当米粉丝硬度小于 8000 g、咀嚼性为 2500~5100 g、弹性大于 0.89 时, 米粉丝的蒸煮品质和感官品质较为理想。本研究中, 5.7% 岩茶组米粉丝的硬度为 3502.28 ± 623.41 g, 弹性为 1.16 ± 0.27 , 咀嚼性为 2614.26 ± 873.64 , 感官品质较为理想, 与上述研究结果较为吻合。

2.3 武夷岩茶米粉丝的挥发性物质

对添加 5.7% 武夷岩茶米粉丝和对照组进行风味物质测定, 并将相对含量 $\geq 0.10\%$ 的物质进行统计, 结果如表 4 所示。由表 4 可以看出, 两组米粉丝中的风味物质种类和含量存在明显差异。存在于 5.7% 岩茶组样品中而不存在于对照组样品中的风味物质如下: 醛类: (E)-2-己烯醛(绿叶香)、苯乙醛(甜

香)、2,4-二甲基苯甲醛(甜香、苦杏仁味)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(油脂香、蜡香、绿叶香); 醇类: 1-壬烯-4-醇、6-甲基-2-烯-4-醇、2-苯乙醇(玫瑰香)、香叶醇(玫瑰香)、5-二甲基-环己醇、2,4-二乙基庚烷-1-醇; 酮类: 2-庚酮(药香、果香)、1-辛烯-3-酮(蘑菇香、金属味); 酯类: 二氢猕猴桃内酯(香豆素香、麝香); 烯炔类: (Z)-4-十四烯和 8-甲基-1-十一碳烯; 烷烃类: 2,5-二甲基十三烷、2,6,10-三甲基十三烷、4-甲基十五烷、8-己基十五烷、2,6,10-三甲基十五烷、姥鲛烷(清新香甜味)和植烷; 其他类: 苯乙腈(芳香气味)、吡啶(橙香、茉莉花香)。存在于对照样品中而不存在于 5.7% 岩茶组样品中的风味物质如下: 反-2-十一烯醇、2-辛基-1-癸醇、二十八烷醇、香叶基丙酮(花香)、棕榈酸乙酯(微弱蜡香、果爵和奶油香气)、棕榈酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯(芳香气味)、2-乙基己基特戊酸酯、2,7,10-三甲基十二烷、4,6-二甲基-十二烷、十七烷、十八烷。在 5.7% 岩茶组样品中的含量显著高于对照组中的风味物质为: 反式-2,4-庚二烯醛(青草香)、反式-2-辛烯醛(绿叶香)、反式-2-癸烯醛(绿叶香、坚果香、油脂香)、2-十一烯醛、1-辛烯-3-醇(蘑菇味)、反式-2-辛烯-1-醇、水杨酸辛酯、2,6,10-三甲基-十二烷和 2-戊基咪喃(豆类、水果、青味, 蔬菜)。在对照组中的含量显著高于 5.7% 岩茶组样品的风味物质有: 癸醛(花果香)、6-甲基-5-庚烯-2-酮(柠檬草香)、植酮(清香)、2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇单异丁酸酯、2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯、肉豆蔻酸异丙酯(类似肉豆蔻的辛味)、4-甲基-十二烷和十四烷。两组样品中含量差异不显著的风味物质为: 庚醛(果香)、辛醛(柠檬香、绿叶香)、反式-2-壬醛(绿叶香、胡桃香)、十三醛(花香、甜香)、十四烷醛(油脂香、柑橘香)、十六醛(果香)、辛醇(油脂

表 4 武夷岩茶米粉丝的主要挥发性物质

Table 4 Main volatile substances of rice noodles with Wuyi rock tea

类别	名称	对照组	A3	风味描述
醛类	(E)-2-己烯醛(青叶醛)	0.00±0.00	0.27±0.03***	绿叶香
	庚醛	0.19±0.02	0.21±0.02	果香
	反式-2-庚醛	2.48±0.21	4.92±0.48***	杏仁香
	反式-2,4-庚二烯醛	0.06±0.01	0.11±0.02*	青草香
	辛醛	0.92±0.08	1.03±0.12	柠檬香、绿叶香
	苯乙醛	0.00±0.00	0.27±0.02***	甜香
	反式-2-辛烯醛	0.72±0.07	1.55±0.12**	绿叶香
	壬醛	10.35±1.01	5.13±0.42***	玫瑰花香、柑橘香
	反式-2-壬醛	1.03±0.11	1.11±0.12	绿叶香、胡桃香
	癸醛	1.34±0.11	0.66±0.09**	花果香
	反式-2-癸烯醛	1.41±0.16	3.02±0.30**	绿叶香、坚果香、油脂香
	2-十一烯醛	0.22±0.03	0.32±0.03*	甜香
	2,4-二甲基-苯甲醛	0.00±0.00	1.42±0.12***	甜香、苦杏仁味
	(E,E)-2,4-壬二烯醛	0.00±0.00	1.53±0.15***	油脂香、蜡香、绿叶香
	十三醛	1.53±0.14	1.22±0.09	花香、甜香
	十四烷醛	0.59±0.06	0.51±0.03	油脂香、柑橘香
十六醛	0.22±0.01	0.19±0.03	果香	

续表4

类别	名称	对照组	A3	风味描述	
醇类	1-辛烯-3-醇(蘑菇醇)	0.73±0.04	1.61±0.16**	蘑菇味	
	3,5-辛二烯-2-醇	0.78±0.05	3.13±0.32***		
	反式-2-辛烯-1-醇	0.34±0.02	0.46±0.05*		
	辛醇	0.59±0.04	0.70±0.09	油脂香、柑橘香	
	1-壬烯-4-醇	0.00±0.00	0.13±0.01***		
	6-甲基-2-烯-4-醇	0.00±0.00	0.31±0.02***		
	2-苯乙醇	0.00±0.00	0.15±0.02***	玫瑰香	
	反-2-十一烯醇	0.13±0.01	0.00±0.00***		
	3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇(香叶醇)	0.00±0.00	0.26±0.03***	玫瑰香	
	5-二甲基-环己醇	0.00±0.00	0.34±0.02***		
	2,4-二乙基-庚烷-1-醇	0.00±0.00	0.10±0.01***		
	2-辛基-1-癸醇	0.49±0.04	0.00±0.00***		
	二十八烷醇	0.10±0.01	0.00±0.00***		
	酮类	2-庚酮	0.00±0.00	0.13±0.01***	药香、果香
		1-辛烯-3-酮	0.00±0.00	0.23±0.02***	蘑菇香、金属味
6-甲基-5-庚烯-2-酮		0.10±0.01	0.06±0.01**	柠檬草香	
2,5-辛二酮		0.13±0.01	0.11±0.02		
香叶基丙酮		0.59±0.06	0.00±0.00***	花香	
酯类	植酮	1.19±0.11	0.54±0.03**	清香	
	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇单异丁酸酯	0.37±0.04	0.18±0.02**		
	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	0.24±0.02	0.13±0.01**		
	二氢猕猴桃内酯	0.00±0.00	0.28±0.03***	香豆素香、麝香	
	2-乙基己基特戊酸酯	1.53±0.14	0.00±0.00***		
	水杨酸辛酯	0.62±0.05	1.55±0.16***	典型性无刺激性气味	
	肉豆蔻酸异丙酯	0.58±0.04	0.24±0.03**	类似肉豆蔻的辛味	
	棕榈酸甲酯	0.26±0.02	0.00±0.00***	低气味	
	邻苯二甲酸二丁酯	1.47±0.13	0.00±0.00***	芳香气味	
	棕榈酸乙酯	0.21±0.02	0.00±0.00***	微弱蜡香、果爵和奶油香气	
烯烃类	邻苯二甲酸二异丁酯	0.00±0.00	1.02±0.11***	略有芳香气味	
	(Z)-4-十四烯	0.00±0.00	0.17±0.02***		
烷烃类	8-甲基-1-十一碳烯	0.00±0.00	0.33±0.03***		
	2-甲基-十一烷	0.22±0.01	0.19±0.02		
	2,5-二甲基-十一烷	0.76±0.02	0.08±0.01***		
	十二烷	0.49±0.01	0.45±0.03	汽油味	
	4-甲基-十二烷	0.54±0.04	0.43±0.02*		
	4,6-二甲基-十二烷	3.11±0.25	0.00±0.00***		
	2,6,10-三甲基-十二烷	0.07±0.01	0.44±0.03***		
	2,7,10-三甲基-十二烷	0.76±0.05	0.00±0.00***		
	2,5-二甲基-十三烷	0.00±0.00	0.76±0.04***		
	2,6,10-三甲基-十三烷	0.00±0.00	1.06±0.09***		
	十四烷	0.59±0.06	0.41±0.03*		
	4-甲基-十五烷	0.00±0.00	0.16±0.02***		
	8-己基-十五烷	0.00±0.00	0.35±0.03***		
	2,6,10-三甲基-十五烷	0.00±0.00	0.65±0.05***		
	姥鲛烷	0.00±0.00	0.33±0.04***	清新香甜味	
	十六烷	0.14±0.01	0.11±0.03	臭鸡蛋味	
	其他	植烷	0.00±0.00	0.35±0.03***	
		十七烷	0.59±0.05	0.00±0.00***	
十八烷		0.36±0.04	0.00±0.00***	苦味	
2-戊基呋喃		0.27±0.02	0.38±0.03*	豆类、水果、青味、蔬菜	
苯乙腈		0.00±0.00	0.11±0.02***	芳香气味	
吡啶	0.00±0.00	0.39±0.04***	橙香、茉莉花香		

注: 采用独立样本t检验法进行比较, 同一行数值右上方*表示与对照组相比差异显著($P<0.05$), **表示与对照组相比差异极显著($P<0.01$), ***表示与对照组相比差异高度显著($P<0.001$)。

香、柑橘香)、2,5-辛二酮、2-甲基-十一烷、十二烷和十六烷。以上结果表明添加 5.7% 武夷岩茶的米粉保留了岩茶主要香气物质(香叶醇、2-苯乙醇、苯乙醛、(E)-2-己烯醛^[15,26-27]),并呈现玫瑰花香、绿叶香、甜香、果香的香气特征。

2.4 武夷岩茶米粉的淀粉体外消化特性

对各组米粉的淀粉体外消化特性进行测定,其结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,随着岩茶添加量的增加,米粉的 RDS 和 SDS 比例呈逐渐降低趋势,RS 比例则呈逐渐增加趋势,且呈现明显的量效关系。与对照组相比,添加 4.3%~8.7% 岩茶的米粉的 RDS 含量显著降低($P<0.05$),各岩茶组米粉的 SDS 含量显著降低($P<0.05$),RS 含量显著增加($P<0.05$)。其中,添加 5.7% 岩茶的米粉的快消化淀粉(RDS)含量较对照组下降了 8.69%,抗性淀粉(RS)含量较对照组增加了 14.34%。结果表明,武夷岩茶的添加能够明显降低米粉的 RDS 和 SDS 含量,提高米粉的 RS 含量,显著延缓米粉淀粉的体外消化性能。鉴于 RS 对肠道微生物的有益调节作用^[28-30],添加岩茶的米粉可能会对人体肠道产生健康益处。据报道,茶多酚可通过改变大米淀粉的结构以及影响消化酶-淀粉的相互作用来降低淀粉的体外消化率^[3,31]。另一方面,茶叶中的生物活性物质(如水溶性茶多糖、儿茶素和茶黄素)可通过抑制 α -淀粉酶的活性来降低淀粉的体外消化率^[15,32]。因此,武夷岩茶降低米粉淀粉的体外消化率可能主要基于上述两方面。综上,在米粉中添加武夷岩茶能够显著延缓米粉的消化性能,提高米粉的营养保健价值。

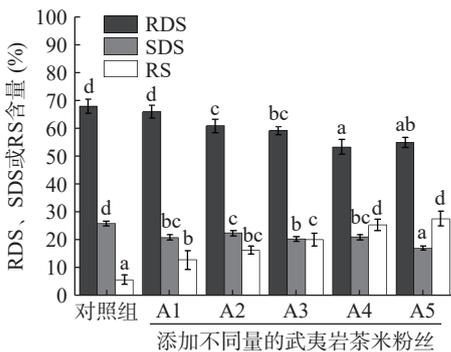


Fig.1 Characteristics of *in vitro* digestibility of rice noodles fortified with Wuyi rock tea

注:同一颜色柱形图上方不同字母表示差异具有显著性($P<0.05$)。

2.5 武夷岩茶米粉的抗氧化活性

对各组米粉样品的总酚含量和抗氧化活性进行测定,结果如图 2 所示。

图 2 显示,随着岩茶添加量的增加,米粉的总酚含量逐渐增加,抗氧化活性也逐渐增强,并且呈现明显的量效关系。与对照组相比,各岩茶组米粉的总酚含量显著更高($P<0.05$),总抗氧化能力以及对

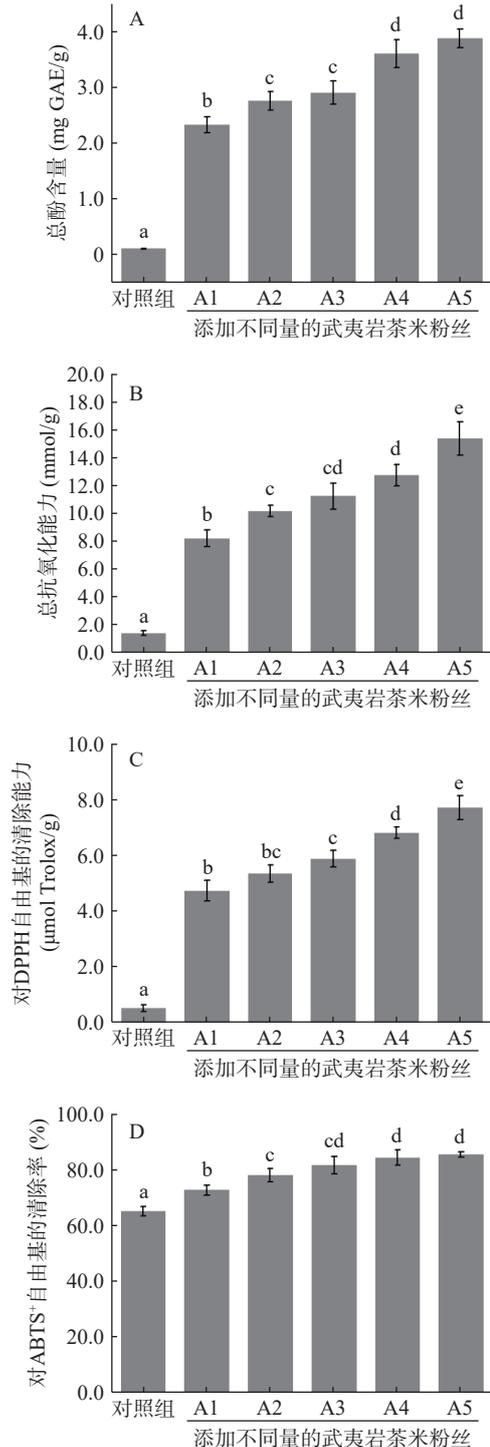


图 2 武夷岩茶米粉的总酚含量(A)、总抗氧化能力(B)、对 DPPH 自由基的清除能力(C)和对 ABTS⁺ 自由基的清除率(D)

Fig.2 Total phenol content (A), total antioxidant capacity (B), DPPH free radical scavenging ability (C) and ABTS⁺ free radical scavenging rate (D) of rice noodles with Wuyi rock tea

注:柱形图上方不同字母表示差异具有显著性($P<0.05$)。

DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除能力也显著更强($P<0.05$)。当岩茶添加量为 5.7% 时,米粉的总抗氧化能力是对照组的 7.48 倍,对 DPPH 自由基的清除能力为 $5.92 \pm 0.30 \mu\text{mol Trolox/g}$,对 ABTS⁺ 自由基的清除率达到 $82.10\% \pm 3.10\%$ (每 0.2 g 米粉)。以上结果表明,添加武夷岩茶能显著提高米粉的抗

氧化活性。

3 结论

添加 2.9%~7.0% 武夷岩茶对米粉丝断条率无明显影响,但添加 8.3% 武夷岩茶会显著增加米粉丝的断条率。添加武夷岩茶显著降低了米粉丝的硬度、粘聚性、胶着性、咀嚼性和回复性,其中添加 5.7% 武夷岩茶的米粉丝获得较为理想的质构特性,体现为较高的弹性、适中的硬度和咀嚼性。添加武夷岩茶显著提高了米粉丝的气味分值、食味分值以及感官总分值。添加 5.7% 岩茶的米粉丝保留了岩茶的主要香气物质(香叶醇、2-苯乙醇、苯乙醛、(E)-2-己烯醛),并获得最高的感官总评分。添加武夷岩茶能够显著降低米粉丝快消化淀粉(RDS)比例,显著增加抗性淀粉(RS)比例与抗氧化能力。

© 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] LI C M, YOU Y X, CHEN D, et al. A systematic review of rice noodles: raw material, processing method and quality improvement[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 107: 389-400.
- [2] 卫攀杰, 陈洁, 许飞, 等. 保鲜方式对鲜湿米粉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 44-49. [WEI P J, CHEN J, XU F, et al. Effects of fresh-keeping methods on the quality of fresh wet rice noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 44-49.]
- [3] FU T T, NIU L Y, LI Y, et al. Effects of tea products on *in vitro* starch digestibility and eating quality of cooked rice using domestic cooking method[J]. Food & Function, 2020, 11(11): 9881-9891.
- [4] GONG Z H, JIAO P F, HUANG F, et al. Separation and antioxidant activity of the water-soluble yellow monascus pigment and its application in the preparation of functional rice noodles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023: 115172.
- [5] YANG D M, LEW H L, MAK Y Y, et al. Incorporation of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) seed powder into fresh rice noodles with tapioca starch improves postprandial glycemia, insulinemia and satiety in healthy human volunteers[J]. Journal of Functional Foods, 2023, 100: 105382.
- [6] ENGLYST K N, ENGLYST H N. Carbohydrate bioavailability[J]. British Journal of Nutrition, 2005, 94(1): 1-11.
- [7] LI Y, XIAO J H, TU J, et al. Matcha-fortified rice noodles: Characteristics of *in vitro* starch digestibility, antioxidant and eating quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111852.
- [8] HUANG S X, CHI C D, LI X X, et al. Understanding the structure, digestibility, texture and flavor attributes of rice noodles complexation with xanthan and dodecyl gallate[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107538.
- [9] 吴邦强. 不同产地武夷岩茶品质差异分析[J]. 现代农业科技, 2023(4): 177-181,195. [WU B Q. Analysis of quality difference of Wuyi rock tea from different producing areas[J]. Science and Technology of Modern Agriculture, 2023(4): 177-181,195.]
- [10] WANG Q, GUAN X F, LAI C C, et al. Selenium enrichment improves anti-proliferative effect of oolong tea extract on human

hepatoma HuH-7 cells[J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 147: 111873.

[11] WANG Q, HUANG J Q, ZHENG Y F, et al. Selenium-enriched oolong tea (*Camellia sinensis*) extract exerts anti-inflammatory potential via targeting NF- κ B and MAPK pathways in macrophages[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(3): 635-642.

[12] WU Z, ZENG W Z, ZHANG X, et al. Characterization of acidic tea polysaccharides from yellow leaves of Wuyi rock tea and their hypoglycemic activity via intestinal flora regulation in rats[J]. Foods, 2022, 11(4): 617.

[13] 彭凯雄, 郑钰涵, 徐天泽, 等. 茶叶活性成分的功能及其健康食品研究进展[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(3): 17-20. [PENG K X, ZHENG Y H, XU T Z, et al. Research progress on the function of active ingredients of tea and its health food[J]. Grain and Oil, 2023, 36(3): 17-20.]

[14] MUJTABA H, JAT B L, GANI A. Effect of green tea polyphenols on the techno-functional and nutraceutical properties of himalayan rice (*Mushk budji*) [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2023, 29: 100344.

[15] SUN L J, WARREN F J, NETZEL G, et al. 3 or 3'-Galloyl substitution plays an important role in association of catechins and theaflavins with porcine pancreatic α -amylase: The kinetics of inhibition of α -amylase by tea polyphenols[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 26: 144-156.

[16] 王佳玉, 陈碧莹, 陈凤莲, 等. 不同杂粮添加对籼米粉粉质特性及挤压米粉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 66-72. [WANG J Y, CHEN B Y, CHEN F L, et al. Effects of different grain additions on the quality characteristics of Indica rice flour and extruded rice flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 66-72.]

[17] 任元元, 孟资宽, 邹育, 等. 发酵对方便米粉品质影响的研究[J]. 食品与发酵科技. 2019, 55(6): 46-49,64. [REN Y Y, MENG Z K, ZOU Y, et al. Study on the effect of fermentation on the quality of instant rice flour[J]. Food and Fermentation Technology, 55(6): 46-49,64.]

[18] BAE I Y, OH I K, JUNG D S, et al. Influence of arabic gum on *in vitro* starch digestibility and noodle-making quality of Segoa-mi[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 125: 668-673.

[19] GENG D H, TANG N, ZHANG X J, et al. Insights into the textural properties and starch digestibility on rice noodles as affected by the addition of maize starch and rice starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114265.

[20] 唐煜括, 郑波, 徐捍山, 等. 茶多酚、抹茶对鲜湿米粉储藏过程中老化行为与消化性能影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(2): 1-6. [TANG Y K, ZHENG B, XU H S, et al. Effects of tea polyphenols and matcha on aging behavior and digestive performance of fresh and wet rice flour during storage[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(2): 1-6.]

[21] QAZI I M, KUMAR R S, TRAN T. Effect of physico-chemical properties of tropical starches and hydrocolloids on rice gels texture and noodles water retention ability[J]. Starch-Stärke, 2011, 63(9): 558-569.

[22] 卿明义, 林莹. 米粉凝胶强度与米粉品质指标的相关性研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 103-108. [QING M Y, LIN Y. Study on correlation between gel strength of rice flour and quality index of rice noodles[J]. Preservation and Processing, 2020, 20(1): 103-108.]

- [23] WU Y, CHEN Z X, LI X X, et al. Effect of tea polyphenols on the retrogradation of rice starch[J]. *Food Research International*, 2008, 42(2): 221-225.
- [24] XIAO H X, LIN Q L, LIU G Q, et al. Evaluation of black tea polyphenol extract against the retrogradation of starches from various plant sources[J]. *Molecules*, 2012, 17(7): 8148-8158.
- [25] 孟亚萍. 挤压米粉丝加工及品质改良技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [MENG Y P. Research on processing and quality improvement technology of extruded rice noodles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [26] 詹宝珍, 吴志锋, 马春华, 等. 焙火时间对武夷岩茶肉桂香气品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(3): 811-819. [ZHAN B Z, WU Z F, MA C H, et al. Effect of roasting time on aroma quality of Wuyi rock tea cinnamon[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2022, 13(3): 811-819.]
- [27] 谢李玲, 薛婉茹, 李丹阳, 等. 外源酶对陈年武夷岩茶香气品质的改善作用[J]. *食品研究与开发*. 2023, 44(5): 155-164. [XIE L L, XUE W R, LI D Y. Effect of exogenous enzymes on aroma quality of aged Wuyi rock tea[J]. *Food Research and Development*, 44(5): 155-164.]
- [28] 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(Suppl 2): 33-50.
- [29] DERY B, LOU Z X. Recent developments in resistant starch as a functional food[J]. *Starch-Stärke*, 2020, 73(3): 2000139.
- [30] WEN J J, LI M Z, HU J L, et al. Resistant starches and gut microbiota[J]. *Food Chemistry*, 2022, 387: 132895.
- [31] LÜ Y Z, ZHANG L M, LI M N, et al. Physicochemical properties and digestibility of potato starch treated by ball milling with tea polyphenols[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 129: 207-213.
- [32] CHUNG J O, YOO S L, LEE Y E, et al. Hypoglycemic potential of whole green tea: Water-soluble green tea polysaccharides combined with green tea extract delays digestibility and intestinal glucose transport of rice starch[J]. *Food & Function*, 2019, 10(2): 746-753.