

马晓丽, 张源, 黄小秀, 等. 不同加工方式对绿茶面条品质特性及多酚消化稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 150–158. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080342

MA Xiaoli, ZHANG Yuan, HUANG Xiaoxiu, et al. Effects of Different Processing Methods on the Quality Characteristics and Polyphenols Digestive Stability of Green Tea Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 150–158. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080342

· 研究与探讨 ·

不同加工方式对绿茶面条品质特性及多酚消化稳定性的影响

马晓丽, 张 源, 黄小秀, 储相宾, 于 鲲*
(安徽科技学院, 安徽滁州 233100)

摘 要: 为明确绿茶粉在面条中的应用价值, 该研究考察了绿茶生鲜面、绿茶冷冻熟面、绿茶风干面的品质特性 (蒸煮、质构、消化以及抗氧化活性), 以及其抗消化和抗氧化特性与多酚的稳定性的关系, 并分析了不同阶段绿茶面条中多酚和多酚单体的生物可及性。结果表明经体外模拟消化后绿茶面条中总酚含量显著 ($P<0.05$) 降低, 不同多酚单体在各个消化阶段的稳定性也有所不同, 绿茶面条中多酚单体的释放量在口腔消化阶段处于较低水平, 到胃消化阶段后才被较好地释放。其中冷冻熟面在口腔到胃消化阶段过程中, EGC、EGCG、EC 和 ECG 的释放量分别从 0.29 mg/g 增加到 0.61 mg/g, 0.29 mg/g 增到 0.52 mg/g, 0.07 mg/g 增到 0.10 mg/g 和 0.02 mg/g 增到 0.03 mg/g, 表明多酚单体在胃消化阶段中稳定性较好。经小肠消化阶段后多酚单体 EGC、EGCG、EC 和 ECG 的释放量分别降至 0.24、0.13、0.05 和 0.00 mg/g。综合对比发现不同加工方式的绿茶面条品质存在显著差异 ($P<0.05$), 其抗氧化特性及抗消化特性与多酚的稳定性呈正向相关。其中冷冻熟面总酚在不同消化阶段中的生物可及性较高, 在口腔、胃、小肠阶段分别为 16.96%、49.99% 和 6.79%。而且, 冷冻熟面中抗性淀粉含量最高为 12.85%、估计血糖指数 (eGI) 值最低为 87.37, 品质特性相对较好, 此结果可为提升绿茶面条的功能特性提供理论依据与应用基础。

关键词: 绿茶面条, 体外模拟消化, 多酚稳定性, 生物可及性, 估计血糖指数

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)15-0150-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080342



本文网刊:

Effects of Different Processing Methods on the Quality Characteristics and Polyphenols Digestive Stability of Green Tea Noodles

MA Xiaoli, ZHANG Yuan, HUANG Xiaoxiu, CHU Xiangbin, YU Kun*

(Anhui University of Science and Technology, Chuzhou 233100, China)

Abstract: This study investigated the quality characteristics (cooking, textural, digestive, and antioxidant properties) of fresh green tea noodles, frozen-cooked green tea noodles, and dried green tea noodles, as well as the relationship between their antidigestive and antioxidant properties with the stability of polyphenols, and then analysed the biological accessibility of polyphenols and polyphenol monomers in the different phases of green tea noodles to clarify the application value of green tea powder in noodles. Results showed that the total polyphenol content of green tea noodles decreased significantly after *in vitro* simulated digestion ($P<0.05$). There were obvious differences in the stability of different polyphenol monomers at different stages of digestion, the release of polyphenolic monomers in green tea noodles was at a relatively low level during the oral digestion stage, and was only well released after the gastric digestion stage. During the oral to gastric digestion stage, the release levels of EGC, EGCG, EC, and ECG in frozen-cooked noodles increased from 0.29 mg/g

收稿日期: 2024-08-28

基金项目: 安徽科技学院引进人才项目 (SPYJ202102); 安徽省高等学校科学研究项目 (自然科学类) (2022AH051647); 安徽科技学院校级科研项目 (2021zryb19)。

作者简介: 马晓丽 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 以绿茶及高粱为原料的功能面制品研究, E-mail: yjs2022285@ahstu.edu.cn。

* 通信作者: 于鲲 (1989-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 绿茶面制品及低 GI 杂粮食品, E-mail: yukun@ahstu.edu.cn。

to 0.61 mg/g, 0.29 mg/g to 0.52 mg/g, 0.07 mg/g to 0.10 mg/g, and 0.02 mg/g to 0.03 mg/g, respectively, these results indicated that polyphenolic monomers had good stability during the gastric digestion stage. After the small intestine digestion stage, the release levels of EGC, EGCG, EC, and ECG decreased to 0.24, 0.13, 0.05, and 0.00 mg/g, respectively. The comprehensive comparison results showed that the quality of green tea noodles from different processing methods was significantly different ($P<0.05$), and the antioxidant and antidigestive properties were positively correlated with the stability of polyphenols. Among them, total polyphenols in freeze-cooked noodles exhibited the higher bioaccessibility across different digestive stages, with values of 16.96% in the oral stage, 49.99% in the gastric stage, and 6.79% in the small intestinal stage, respectively. Moreover, the highest resistant starch content in frozen-cooked noodles was 12.85%, and the lowest estimated glycemic index (eGI) value was 87.37, and frozen-cooked noodles had relatively good quality characteristics. This result could provide theoretical basis and application basis for improving the functional characteristics of green tea noodles.

Key words: green tea noodles; *in vitro* simulated digestion; polyphenol stability; biological accessibility; estimated glycemic index

近年来,精细化饮食及过度的饮食导致了慢性疾病的发生率增加,人们对健康化主食的关注度日益攀升。面条作为中国传统主食之一,在饮食模式中起着重要的作用,但其快速消化淀粉含量高,食用后人体血糖会快速上升,对糖尿病、肥胖症等特殊需求人群不利^[1]。因此,开发具有个性化营养功能的面条越来越受到食品行业的关注。中国是全球最大的茶叶生产国,茶资源丰富^[2]。绿茶中的茶多酚是一种天然化合物,具有降低血压、抗氧化、抗癌和抑制慢性疾病等效果^[3-7],在食品领域展现出巨大的发展前景。因此,本研究选择绿茶粉作为营养添加剂制成绿茶面条,以改善面条品质及功能特性,从而满足消费者对面制品健康和营养的需求。

绿茶面条的抗氧化特性及抗消化特性与多酚的稳定保留存在密切相关性^[8]。绿茶面条中多酚保留不仅受其加工过程影响,还与其食用过程中多酚的稳定性有关,这会直接关系到绿茶面条中多酚的生物可及性。Henning 等^[9]研究发现茶多酚经过生物体消化后利用率仅有 10.00%,也有研究报道儿茶素在小鼠体外模拟肠道消化过程中损失率达到 40.00% 以上^[10],这些结果都是由于茶多酚在胃肠道消化过程中会发生降解破坏,导致其生物可及性较低。胃的酸性环境能够使茶多酚中的 EGCG 降解成酚酸,酚酸只有少部分在胃、小肠被吸收,大部分进入结肠,被结肠微生物分解释放^[11]。茶多酚作为绿茶面条中主要的功能性成分,在人体消化过程中极易损失,活性难以保持。目前关于多酚化合物研究主要集中在消化对多酚单体的影响,对于不同加工产品在消化过程中的酚类物质释放规律鲜有报道。

因此,该实验研究了三种加工工艺制备的绿茶面条(生鲜面、冷冻熟面、风干面)品质特性以及其多酚消化前后的含量和抗氧化特性的变化,并结合消化过程中多酚稳定性分析了绿茶面条中淀粉的抗消化特性,从加工和食用两个方面全方位地揭示绿茶面条中多酚的稳定性,为提升绿茶面条的功能特性提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

富强高筋小麦粉 水分含量 12.84%,蛋白质含量 12.25%,灰分含量 0.57%,金沙河集团有限公司;绿茶粉 水分含量 4.14%,茶多酚含量 160 mg/g,杭州塞纳茶叶有限公司;食盐 河南省盐业总公司;猪胰腺 α -淀粉酶(14 U/mg)、胃蛋白酶(2500 U/mg)、胰酶(≥ 300 U/mg)、葡萄糖苷酶(50 U/mg) 上海源叶生物科技有限公司;葡萄糖试剂盒 南京建成生物工程研究;其他试剂均为分析纯。

MT25 压面机 广东恒联食品机械有限公司;DGG-9240B 电热鼓风干燥箱 上海森信实验仪器有限公司;TQN34FBJ-SA 蒸烤箱 美的集团有限公司;TS-110X50 水浴摇床 上海天呈实验仪器制造有限公司;KDC-160HR 高速冷冻离心机 科大创新股份有限公司;SP-752 紫外分光光度计 南京联创分析仪器有限公司;LC-20AT 高效液相色谱仪 日本岛津仪器有限公司;CT3 质构仪 美国 Brookfield 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 绿茶面条的制作 绿茶面条参照 Yu 等^[8]的方法制作,将 100 g 小麦粉与 2.0 g 绿茶粉置于和面机中混合均匀后,加入 40 mL 含有 1.0 g 盐的蒸馏水,使其经过和面形成混合面团。制备好的面团经 25 °C 熟化 30 min 后,进行压面将其压成 0.8 mm 厚的面片。最后,将面片切成宽为 2.0 mm 的面条,制成绿茶生鲜面。将生鲜面置于 100 °C 蒸烤箱中蒸 8 min,将蒸好的绿茶面条分成两部分,一部分在 -18 °C 的冰箱中冷冻 24 h,制成冷冻熟面,另一部分在 45 °C 的烘箱中烘干 3 h,制成风干面。最后将生鲜面、冷冻熟面和风干面煮至最佳蒸煮时间后经冻干、研磨成 80 目粉末用于测试。

1.2.2 绿茶面条蒸煮特性的测定

1.2.2.1 最佳蒸煮时间的测定 根据孟凡娜等^[1]的方法,将 20 根面条置于 500 mL 沸水中,每隔 10 s 取出一根,观察其中心是否存在白芯,重复实验三次,最终以面条煮至白芯刚好消失的时间为最佳蒸煮时间。

1.2.2.2 吸水率和蒸煮损失率的测定 取一定质量的面条在 500 mL 沸水中煮至最佳蒸煮时间,取出煮熟的面条,冷水冲 10 s,用滤纸迅速擦掉面条表面的水分,称量其重量。同时,将面汤和冲洗水收集在 500 mL 的容量瓶中定容。再将 100 mL 面汤倒入已干燥至恒定重量的烧杯中,并使其在红外炉上蒸发至少部分水剩余。最后,在 110 ℃ 的烘箱中将烧杯干燥至恒重^[1]。每个实验重复进行三次,依据下面公式计算:

$$Wm(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: Wm 表示面条吸水率,%; W₁ 表示蒸煮前面条质量, g; W₂ 表示蒸煮后面条质量, g。

$$D(\%) = \frac{5(W_4 - W_3)}{W_1} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: D 表示面条蒸煮损失率,%; W₃ 表示倒入面汤前恒重烧杯的质量, g; W₄ 表示烘干后面汤和烧杯的质量, g。

1.2.3 绿茶面条质构特性的测定 面条质构特性的测定参考蒲华寅等^[12]方法并稍做修改。将 10 根待测面条置于 500 mL 沸水中,煮至最佳蒸煮时间,取出后用冷水冲洗 10 s,用滤纸吸干表面多余的水分。实验参数设定:采用 TA10 平底柱型探头,测试速率为 3.0 mm/s、目标值 0.5 mm、感应力 5 g、2 次压缩间隔 10 s,对每一种样品进行 6 次以上的试验,最后结果取所有测试的平均值。

1.2.4 绿茶面条中淀粉消化特性的测定 淀粉水解率和估计血糖生成指数(eGI)采用 Huang 等^[13]的方法建立体外淀粉消化模型进行测定,并稍作修改。所有绿茶面条冻干粉末研磨成 80 目粉末备用。所有绿茶面条样品的总淀粉含量均按国家标准(GB 5009.9-2016)采用酸水解法进行分析,称取 100 g 待测样品于 50 mL 锥形瓶中,并加入 15 mL pH5.2 的醋酸钠缓冲液、猪胰腺 α-淀粉酶(290 U/mL)和淀粉葡萄糖苷酶(15 U/mL),将锥形瓶置于 37 ℃ 水浴摇床中振荡。在设定的时间节点(0、5、20、60、120、150、180 min)取等量水解液(0.5 mL),并与 2.0 mL 无水乙醇混合使酶失活,并在 4000×g 下离心 15 min,使用 GOPOD 检测试剂盒测定淀粉水解过程中释放的葡萄糖质量浓度,计算公式如下:

$$RDS(\%) = \frac{G_{20} - G_0}{TS} \times 0.9 \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

$$SDS(\%) = \frac{G_{120} - G_{20}}{TS} \times 0.9 \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

$$RS(\%) = \frac{TS - RDS - SDS}{TS} \times 0.9 \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

式中: RDS 表示快消化淀粉含量,%; SDS 表示慢消化淀粉含量,%; RS 表示抗性淀粉含量,%; G₀ 表示 0 min 时释放的葡萄糖, mg/g; G₂₀ 表示

20 min 后释放的葡萄糖, mg/g; G₁₂₀ 表示 120 min 后释放的葡萄糖, mg/g; TS 表示总淀粉含量, mg/g。

eGI 根据 Huang 等^[13]方法计算,公式如下:

$$eGI = 0.862HI + 8.198 \quad \text{式 (6)}$$

式中: eGI 表示估计血糖指数; HI 表示样品水解曲线下的面积与白面包水解曲线下的面积之比。

1.2.5 绿茶面条体外模拟消化液的制备 按照 Minekus 等^[14]所描述的方法进行模拟口腔-胃肠消化。消化液:模拟唾液(SSF)、模拟胃液(SGF)和模拟小肠液(SIF)参考辛相余^[15]的方法进行配制,用 NaOH 和 HCl 调整溶液 pH。

口腔消化:将 2 g 冻干样品粉末、SSF(5 mL)、CaCl₂(H₂O)₂(0.3 mol/L 25 μL)、α-淀粉酶溶液(0.5 mL 1500 U/mL,由 SSF 电解质原液制备)和去离子水(2.075 mL)置于 50 mL 离心管中。将混合物置于振荡的 37 ℃ 恒温摇床中反应 5 min。

胃消化:在 10 mL 口腔消化液中加入 7.5 mL SGF 及 CaCl₂(H₂O)₂溶液(0.3 mol/L 0.2 mL)置于试管中,然后添加胃蛋白酶溶液(80000 U/mL 1.6 mL,由 10 mmol/L pH6.5 Tris 和 150 mmol/L NaCl 缓冲液配制)使用 HCl 溶液调整至 pH3.0,加入去离子水使混合物的最终体积为 20 mL,将其放置在 37 ℃ 的恒温摇床上,避光反应 2 h。

小肠消化:胃消化后,将 20 mL 消化液、11 mL SIF、CaCl₂(H₂O)₂溶液(0.3 mol/L 40 μL)混合,加入 5 mL 胰酶溶液(800 U/mL, SIF 电解质溶液配制)和 2.5 mL 胆汁(38.4 mg/mL SIF 电解质溶液配制)。最后使用 NaOH 溶液调整至 pH7.0,再加入去离子水,使混合体系的最终体积为 40 mL。将混合物置于 37 ℃ 的恒温摇床上,避光反应 2 h。

在口腔、胃、小肠消化阶段结束时,消化液混合体系在 4 ℃ 下以 4000 r/min 离心 10 min,并将上清液冷冻保存(-20 ℃)备用。

1.2.6 绿茶面条中总酚含量的测定 绿茶面条中总酚的提取:称取 0.25 g 样品(冻干面条粉以及消化液冻干粉)用 5 mL 70% 甲醇在 70 ℃ 水浴摇床中萃取 30 min。经 3780×g 下离心 10 min,反复提取 2 次,收集两次提取液并定容至 10 mL。测定方法参考 Levent^[16]并稍作改动,1 mL 提取液与 4.5 mL 10%(V/V)福林酚混合,再加入 5 mL 7.5% 碳酸钠溶液,然后在室温下避光反应 1 h。最后,用分光光度计在 765 nm 波长处测定吸光度。根据标准曲线方程 $y = 0.0102x + 0.0849$ ($R^2 = 0.9997$),计算总酚含量。

1.2.7 绿茶面条中儿茶素类含量和生物可及性的测定 参照 GB/T 8313-2018 对绿茶面条中儿茶素类(EGC、EGCG、EC 和 ECG)含量进行测定。准确吸取 20 μL 不同质量浓度(0.00、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/mL)的混合标准系列工作液(含 EGC、EGCG、EC 和 ECG 标准品)分别注入高效液

相色谱仪(High performance liquid chromatography, HPLC),并在 C₁₈ 柱(5 μm, 4.6 mm×250 mm)上分离酚类化合物,采用 0.1% 甲酸(B)和甲醇(D)洗脱,测试程序为: 0~5 min, B 97%~90%; 5~30 min, B 90%~65%; 30~40 min, B 65%~60%; 40~50 min, B 60%~10%, 流速 1.0 mL/min, 在 278 nm 波长下检测酚酸, 根据相应的峰面积绘制标准曲线。EGC、EGCG、EC 和 ECG 标准曲线分别为 $y=-17970.29+4246760x$ ($R^2=0.99224$), $y=-26563.14+27908300x$ ($R^2=0.99597$), $y=-30387.52+15198600x$ ($R^2=0.99597$), $y=-91467.95+35216300x$ ($R^2=0.99351$)。取 1.2.5 获得的消化液(20 μL), 在相同的色谱条件下测试(柱温 35 ℃), 根据峰时间和保留时间识别酚类物质, 并根据相应的标准曲线进行定量^[17-18]。参考下面公式计算多酚的生物可及性:

$$B(\%) = \frac{d}{c} \times 100$$

式 (7)

式中: B 表示生物可及性, %; d 表示不同消化阶段后多酚含量, mg/g; c 表示对应的不同消化阶段前多酚含量, mg/g。

1.2.8 绿茶面条抗氧化评价

1.2.8.1 DPPH 自由基清除率 DPPH 自由基清除率的测定参考 Li 等^[19]的方法。取 1.2.5 消化液(2 mL)与 0.2 mmol/L DPPH 溶液(2 mL)混合, 将混合反应溶液在避光条件下反应 30 min, 在 517 nm 处的吸光度记录为 A₁。空白对照用乙醇代替样品提取物, 溶剂对照用乙醇代替 DPPH, 在 517 nm 处测定吸光度。DPPH 自由基清除率计算公式如下:

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_0} \times 100$$

式 (8)

式中: A₀ 表示空白对照组吸光度; A₁ 表示样品组吸光度; A₂ 表示溶剂对照组吸光度。

1.2.8.2 ABTS⁺自由基清除率 根据 Zhu 等^[20]描述的方法测定 ABTS⁺自由基清除率。将 26.5 mg 过硫酸钾与 40 mL 磷酸盐缓冲液(PBS: 0.01 mol/L, pH7.4)反应, 得到 2.45 mmol/L 过硫酸钾。用 153.6 mg ABTS 与 40 mL PBS 反应制备 7 mmol/L ABTS 溶液。ABTS 工作溶液由 2.45 mmol/L 过硫酸钾和 7 mmol/L ABTS 溶液以 1:1(V/V)的比例制备, 然后在室温避光中保存 12~16 h。用 PBS 稀释得到 ABTS 工作液, 稀释液在 734 nm 处的吸光度为 0.70。测定方法为: 将 0.5 mL 绿茶面条提取液或

消化液与 2.5 mL ABTS 工作溶液混合, 室温下反应 6 min 后, 在 734 nm 处进行吸光度测定。空白对照组将 2.5 mL ABTS 工作液与 0.5 mL 乙醇混合, 734 nm 处测定吸光度。ABTS⁺自由基清除率的计算公式如下:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_2} \times 100$$

式 (9)

式中: A₁ 表示样品组吸光度; A₂ 表示空白对照组吸光度。

1.2.8.3 总还原力 绿茶面条的总还原能力采用 Smolakaitė 等^[21]描述的方法进行测定。将 1.0 mL 绿茶面条提取液或消化液加入 2.5 mL PBS (0.2 mol/L, pH6.6)和 2.5 mL 1% 铁氰化钾溶液中, 然后在 50 ℃ 水浴中反应 20 min。反应结束后, 快速冷却至室温, 加入 2.5 mL 10% 三氯乙酸溶液。最后在 3780×g 下离心 10 min, 取 2.5 mL 上清液与 0.5 mL 0.1% 氯化铁溶液和 2.5 mL 蒸馏水混合反应 10 min, 在 700 nm 处读取吸光度值。

1.3 数据处理

利用 Origin 2018 和 SPSS 23 对实验数据进行分析 and 绘图, 方差分析使用 Duncan 检验。当 $P<0.05$ 时, 有显著性差异。所有试验重复 3 次以上, 测定数据以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 不同加工方式对绿茶面条蒸煮和质构特性的影响

由表 1 分析可知, 不同方式制备的绿茶面条的蒸煮时间存在显著性差异($P<0.05$), 其中冷冻熟面的蒸煮时间最短为 96.67 s, 而风干面的蒸煮时间最长为 290.33 s, 这与绿茶面条中水分含量存在密切关系。冷冻熟面由于存在预熟化及含水量较高, 因此其最佳蒸煮时间较短, 风干面则因脱水处理导致含水量较低, 蒸煮过程中水分迁移较慢导致淀粉不易糊化, 使得其最佳蒸煮时间较长。对比不同样品间的蒸煮损失率可知, 冷冻熟面的蒸煮损失最低为 1.35%, 其次是生鲜面为 1.6%, 最高是风干面为 4.41%, 这一结果表明了蒸煮损失与最佳蒸煮时间存在正相关关系。此外, 质构品质分析结果表明冷冻熟面的硬度显著($P<0.05$)高于其他实验组, 弹性显著($P<0.05$)高于风干面, 硬度达到 1214.33 g, 弹性为 0.52 mm。风干面的硬度和弹性相对较低, 这可能是由于风干面的蒸煮损失最高, 大量物质在蒸煮过程中溶出, 面条的凝胶网络结构遭到了破坏, 导致其质构品质下降, 这也

表 1 不同加工方式对绿茶面条的蒸煮和质构特性的影响

Table 1 Effect of different processing methods on the cooking and textural characteristics of green tea noodles

样品	最佳蒸煮时间(s)	吸水率(%)	蒸煮损失(%)	硬度(g)	弹性(mm)
生鲜面	230.00±2.00 ^b	1.03±0.00 ^b	1.60±0.02 ^b	997.33±30.09 ^a	0.49±0.03 ^{ab}
冷冻熟面	96.67±1.53 ^a	0.90±0.00 ^a	1.35±0.02 ^a	1214.33±27.47 ^c	0.52±0.01 ^b
风干面	290.33±1.53 ^c	1.29±0.00 ^c	4.41±0.11 ^c	1062.33±25.81 ^b	0.46±0.02 ^a

注: 同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$), 表2、表3同。

是其口感较差的原因。

2.2 不同加工方式对绿茶面条淀粉消化特性的影响

由图1分析可发现,所研究的三种面条在模拟口腔消化阶段(0~5 min)淀粉水解就开始了,在消化前20 min,淀粉水解速率较快,淀粉在 α -淀粉酶的作用下从面条基质中释放出来。随着消化时间增加,淀粉的消化速率逐渐变缓, α -淀粉酶在口腔中与食物的接触时间很短且其最适pH为6.9, α -淀粉酶在胃阶段可能有残余活性^[22-23],淀粉在胃消化阶段(5~120 min)可能有 α -淀粉酶的参与。在肠道消化阶段(120~180 min)观察到的淀粉水解率先增高,后趋于平稳,直到消化结束。

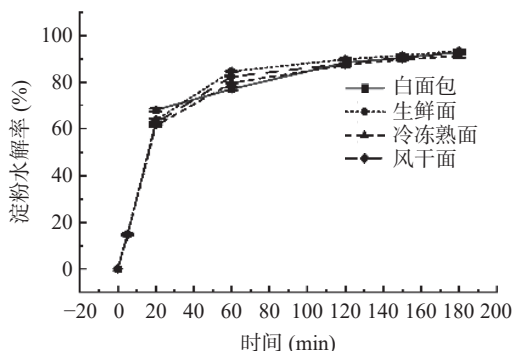


图1 不同加工方式对绿茶面条淀粉水解率的影响
Fig.1 Effect of different processing methods on starch hydrolysis rate of green tea noodles

生鲜面、冷冻熟面和风干面的淀粉水解率分别为94.34%、91.12%和92.52%。生鲜面的淀粉水解率最高,其次是风干面和冷冻熟面。由表2分析可知,生鲜面的快消化淀粉(RDS)为63.71%和慢消化淀粉(SDS)为25.92%含量最高,抗性淀粉(RS)为10.36%含量最低。而冷冻熟面中RS为12.85%含量最高,RDS为61.27%含量最低。这一结果可能与三种面条中的酚类化合物的稳定性有关,有研究表明酚类化合物可以延缓淀粉的消化,增加RS含量^[24]。也可能与老化淀粉的形成存在一定的关系^[25],冷冻熟面加工过程中涉及预蒸过程,再经冷冻后淀粉的重结晶,在一定程度上降低淀粉的消化性^[23]。风干面烘干过程中也会引起淀粉老化,有序的淀粉分子排列使得抗性淀粉的含量增加。生鲜面由于水分含量较高,淀粉老化速率慢,产生抗性淀粉含量较少^[26-27]。分析三种绿茶面条的eGI发现存在显

表2 不同加工方式对绿茶面条消化特性的影响

Table 2 Effect of different processing methods on the digestive characteristics of green tea noodles

样品	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)	$K \times 10^{-2}$ (min^{-1})	eGI
生鲜面	63.71±0.58 ^c	25.92±0.67 ^a	10.36±0.53 ^a	5.25±0.00 ^b	90.34±0.26 ^b
冷冻熟面	61.27±0.38 ^a	25.88±0.52 ^a	12.85±0.24 ^b	5.08±0.00 ^a	87.37±0.10 ^a
风干面	62.46±0.21 ^b	25.37±0.40 ^a	12.17±0.22 ^b	5.16±0.00 ^{ab}	91.09±0.09 ^c

注: K表示消化速率常数。

著性差异($P<0.05$),eGI由大到小依次为风干面(91.09)>生鲜面(90.34)>冷冻熟面(87.37)。结果表明,生鲜面和风干面的淀粉消化率较高,相应的eGI值较高,更易于消化吸收。冷冻熟面的eGI值显著($P<0.05$)降低,对延缓消化有利。

2.3 体外模拟消化对绿茶面条中多酚稳定性的影响

由图2分析可知,不同加工方法制作的绿茶面条中多酚含量存在显著差异($P<0.05$),含量越高表示多酚稳定性越强。未煮时生鲜面中多酚含量最高为3.00 mg/g,风干面中多酚含量最低为2.62 mg/g,这可能与风干面在预蒸和低温烘干过程中的多酚氧化分解以及溶于蒸汽后的多酚流失有关^[28-29]。与未煮的绿茶面条相比,煮后绿茶面条的总酚含量降低,其中冷冻熟面多酚含量保留最高。该结果与绿茶面条中淀粉的消化特性结果一致,多酚可通过疏水作用与淀粉发生非共价作用形成包合物,包合物表现出抗酶降解性,多酚含量保留率越高,抗消化特性越显著^[30]。该研究中通过建立体外模拟消化系统(口腔阶段、胃阶段和小肠阶段),分析熟制后的绿茶面条在消化过程中多酚的释放规律。生鲜面、冷冻熟面和风干面中的多酚经口腔消化后得到较小的释放,多酚释放量依次为0.28、0.32和0.24 mg/g。口腔消化过程中主要以 α -淀粉酶为主要酶,对淀粉中 α -1,4糖苷键具有水解作用^[31]。绿茶面条中多酚类物质可能通过氢键、螯合、共价键、静电作用、疏水作用与淀粉或其他多糖结合^[32-33],因此它们可以通过 α -淀粉酶水解得到释放^[34]。经胃消化阶段后,绿茶面条中多酚较多地被释放,生鲜面、冷冻熟面和风干面中多酚的释放量分别为0.88、0.93和0.83 mg/g,高于口腔消化阶段的多酚释放量。再经小肠消化阶段,生鲜面、冷冻熟面和风干面中多酚的释放量降至最低,分别为0.09、0.18和0.11 mg/g,表明酚类物质在酸性条件(胃部)比在碱性条件(肠道)更加稳定,与Tenore等^[35]的研究结果一致。查阅文献分析多酚在口腔和胃中释放量较多,在肠道中释放量较少,可能与两方

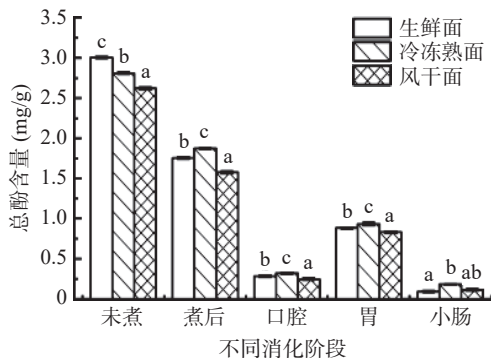


图2 体外模拟消化对总酚含量的影响

Fig.2 Effect of *in vitro* simulated digestion on total phenol content

注: 小写字母不同表示同一阶段下不同样品间差异显著($P<0.05$),图3~图5同。

面原因有关,一是肠道的弱碱性环境会使多酚发生氧化、聚合、降解等反应,导致其含量降低,二是溶液中的氧气也会促使氧化反应的发生,导致多酚进一步损失^[36]。

为进一步分析绿茶面条消化过程中多酚的稳定性,采用高效液相色谱分析法考察了绿茶中的四种关键性儿茶素单体(没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)、表儿茶素没食子酸酯(ECG)、表没食子儿

茶素(EGC)、表儿茶素(EC))的含量变化^[37]。由图 3 分析可知,相比于其他儿茶素单体,在未煮的绿茶面条中 EGCG 的含量最高,其中生鲜面、冷冻熟面和风干面中 EGCG 含量分别为 1.23、1.09 和 0.94 mg/g,蒸煮后绿茶面条中各儿茶素单体均降低。与前文模拟消化过程中总酚释放量的结果一致,不同儿茶素单体在口腔消化阶段的释放量相对较低,而在胃消化阶段具有较高的释放量。例如,由图 3A 可知,生鲜面、冷冻熟面和风干面在胃消化阶段过程中释放的 EGC 含量分别为 0.57、0.61 和 0.53 mg/g。对比分析不同儿茶素在消化阶段的稳定性可知,EGCG 和 ECG 在消化过程中较大程度地被破坏,分析原因可能与酸性胃环境向温和和碱性肠道环境转变有关,这也说明了 EGCG 和 ECG 对肠液 pH 环境更为敏感^[28]。与任淑萌^[38]研究结果一致,研究发现阿魏酸在趋于中性条件下稳定性最高,酸性和碱性条件下其稳定性有所降低。也有研究报道,绿茶儿茶素在 pH>6.0 的溶液中可以发生许多化学变化,如降解氧化和异构化^[39-40]。此外,研究发现茶多酚在消化过程中还会与消化酶间相互作用导致其损失^[41]。综合对比不同方式制备的绿茶面条,结果表明冷冻熟面中儿茶素单体在不同消化阶段的释放量最高,稳定性最好。

2.4 体外模拟消化对绿茶面条多酚生物可及性的影响

植物多酚生理功能十分广泛,但其在人体消化过程中会在消化酶和酸碱作用下导致稳定性发生改变,影响多酚的活性和功能。生物可及性可以反映多酚的消化稳定性,其定义是食物中的多酚被人体消化吸收的占总酚的比例。多酚只有被人体吸收才能发挥其功效,图 4 为体外模拟消化对绿茶面条消化过程中总酚生物可及性的影响。三种不同方式制备的绿茶面条的总酚在口腔消化阶段的生物可及性较高,说明多酚不易被口腔中的消化酶破坏,稳定性较高。总酚在胃消化阶段的生物可及性较口腔消化升高,在小肠消化阶段的生物可及性降低,这可能是由于绿茶面条中多酚在高酸性胃液中的稳定性好,不易被降解破坏,而小肠的弱碱性环境则促进了酚酸的转化^[42]。总之,绿茶面条中多酚经过消化系统的消化后,发生

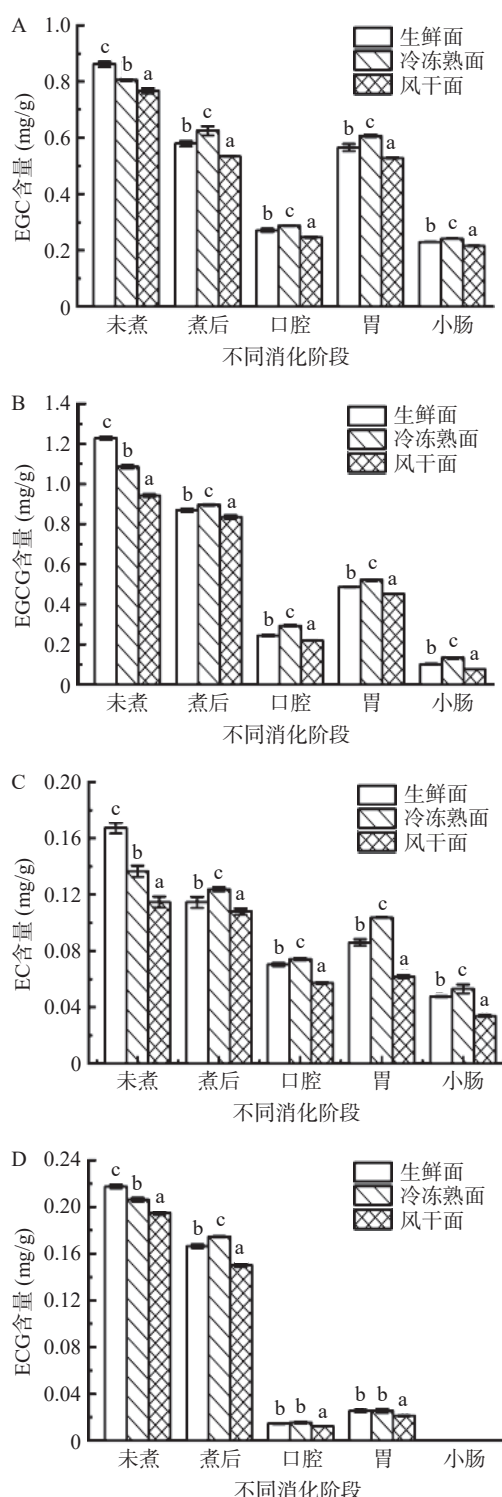


图 3 体外模拟消化对儿茶素主要成分含量的影响

Fig.3 Effect of *in vitro* simulated digestion on the content of the main catechin components

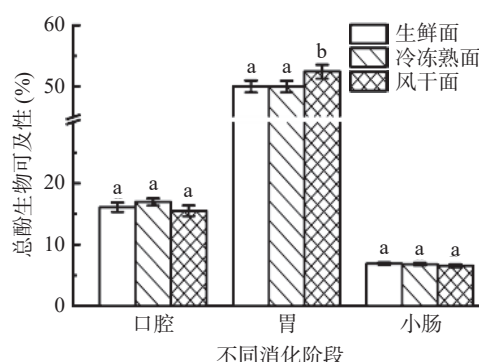


图 4 体外模拟消化对绿茶面条多酚生物可及性的影响

Fig.4 Effect of *in vitro* simulated digestion on the biological accessibility of polyphenols in green tea noodles

了一定程度的降解破坏,与风干面相比,生鲜面和冷冻熟面的总酚在小肠消化阶段的生物可及性较高,分别为 6.88% 和 6.79%。

由图 5 分析可知,四种儿茶素单体的体外模拟消化的生物可及性差异较大。与消化前实验数据相比^[8],体外模拟消化后四种儿茶素单体的生物可及性降低,其中 EGCG 和 ECG 的生物可及性降低幅度较大,EGC 和 EC 在小肠消化阶段的生物可及性较高。生鲜面、冷冻熟面和风干面中 EGC 在小肠消化阶段的生物可及性分别 39.60%、38.52% 和 40.26%,EC 在小肠消化阶段的生物可及性分别为 41.50%、42.80% 和 31.19%,说明三种面条中 EGC 和 EC 在小肠消化阶段的生物可及性具有明显差异。胃消化阶段后的生物可及性明显高于小肠消化阶段后的生物可及性,这可能是由于活性化合物在胃消化阶段过程中的释放量增加所致。

2.5 体外模拟消化对绿茶面条抗氧化特性的影响

采用 DPPH 自由基清除率、ABTS⁺自由基清除率和 TRP 总还原力三种方法研究了三种绿茶面条在未煮、煮后和消化过程中的抗氧化能力的变化。结果如表 3 所示,未煮时,生鲜面的抗氧化能力最强,其中 DPPH、ABTS⁺自由基清除率和 TRP 总还原力分别为 82.73%、65.85% 和 0.85%。绿茶面条抗氧化活性主要来源于其中的多酚,冷冻熟面和风干面由于在加工过程中采用预蒸处理导致多酚损失,使得其抗氧化活性较生鲜面低。煮后的三种绿茶面条的抗氧化活性均显著($P<0.05$)降低,其中冷冻熟面的抗氧化活性最高(DPPH、ABTS⁺自由基清除率和 TRP 总还原力分别为 72.71%、41.33% 和 0.65%),风干面最低(DPPH、ABTS⁺自由基清除率和 TRP 总还原力分别为 64.41%、31.85% 和 0.59%)。这与煮后冷冻熟面中多酚较大幅度地被保留存在密切联系,多酚的含量与抗氧化活性间存在正相关关系。

对比不同消化阶段绿茶面条的抗氧化活性发现,随着消化阶段的逐步进行绿茶面条的抗氧化能力先升高再降低。研究表明胃肠道消化会改变多酚类化合物的理化性质,从而影响其生物和抗氧化性能^[43]。口腔消化阶段中三种面条 DPPH、ABTS 和 TRP 较低,生鲜面、冷冻熟面和风干面的 DPPH 自由基清除率仅为 44.25%、47.72%、40.46%。而在胃消化阶段后,增加至 72.58%、75.50% 和 70.59%,分别

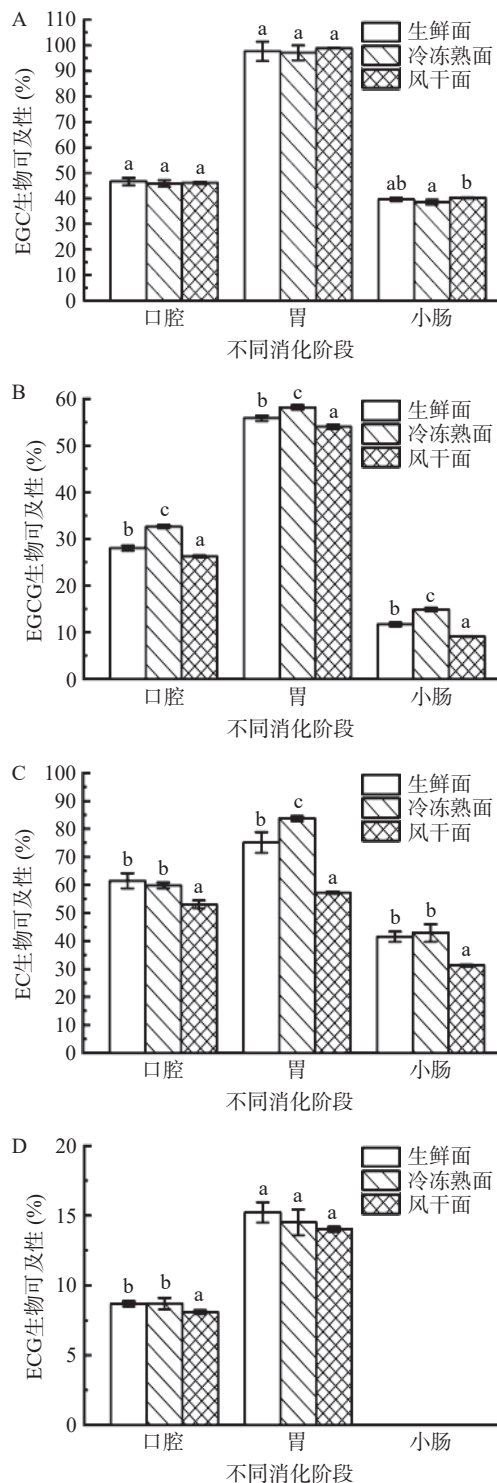


图 5 体外模拟消化对儿茶素主要成分生物可及性的影响

Fig.5 Effect of *in vitro* simulated digestion on the biological accessibility of the main components of catechins

表 3 体外模拟消化对绿茶面条抗氧化特性的影响

Table 3 Effect of *in vitro* simulated digestion on antioxidant characteristics of green tea noodles

消化阶段	DPPH自由基清除率(%)			ABTS ⁺ 自由基清除率(%)			TRP总还原力(%)		
	生鲜面	冷冻熟面	风干面	生鲜面	冷冻熟面	风干面	生鲜面	冷冻熟面	风干面
未煮	82.73±0.37 ^c	80.64±0.37 ^d	78.55±0.37 ^c	65.85±0.93 ^c	63.63±0.51 ^e	54.89±0.44 ^d	0.85±0.00 ^d	0.84±0.00 ^d	0.79±0.00 ^d
煮后	69.10±0.54 ^c	72.71±0.43 ^b	64.41±0.49 ^c	37.19±0.46 ^c	41.33±0.67 ^c	31.85±0.46 ^b	0.64±0.00 ^b	0.65±0.01 ^b	0.59±0.00 ^b
口腔	44.25±0.69 ^a	47.72±0.37 ^a	40.46±0.38 ^a	29.78±0.59 ^b	34.96±0.46 ^b	25.41±0.56 ^a	0.36±0.01 ^a	0.37±0.00 ^a	0.34±0.00 ^a
胃	72.58±0.48 ^d	75.50±0.73 ^c	70.59±0.38 ^d	43.93±0.90 ^d	47.78±0.67 ^d	41.70±0.84 ^c	0.66±0.00 ^c	0.68±0.01 ^c	0.62±0.00 ^c
肠	46.75±0.52 ^b	48.52±0.69 ^a	43.48±0.38 ^b	27.63±0.46 ^a	33.70±0.78 ^a	25.63±0.56 ^a	0.36±0.00 ^a	0.38±0.00 ^a	0.34±0.00 ^a

增加了 64.02%、58.21% 和 74.47%, 均高于口腔消化阶段。与胃消化阶段相比, 小肠消化阶段的三种绿茶面条 DPPH 自由基清除率下降至 46.75%、48.52%、43.48%, 这可能与不同消化阶段中总酚的变化有关, 因其抗氧化能力与酚类活性物质高度相关^[44]。尽管抗氧化测定的机制不同, 但 ABTS⁺自由基清除率和 TRP 总还原力的变化与上述抗氧化实验的变化趋势相似。在消化的不同阶段, 复杂食物系统释放的酚类物质含量不同, 这可能是因为不同消化阶段对酚类物质从食物基质中释放的影响不同^[45]。综上可知, 冷冻熟面在消化过程中的抗氧化活性保留最高。

3 结论

本研究以蒸煮特性、质构特性、消化特性和抗氧化特性为主要指标, 考察了三种加工方式对绿茶面条品质的影响。此外, 通过体外模拟消化实验, 以多酚和多酚单体保留率为主要指标, 进一步考察了绿茶面条品质与多酚保留率的关系, 并分析了不同阶段绿茶面条中多酚生物可及性。结果表明, 与其他两种加工方式相比, 采用冷冻熟面工艺加工的绿茶面条表现出较好的品质, 其中绿茶面条的消化特性和抗氧化特性与多酚保留率呈现正向相关性。研究发现三种不同方式制备的绿茶面条在经加工、烹饪和体外模拟消化后均会表现出总酚含量与抗氧化活性降低的现象, 但冷冻熟面在蒸煮后多酚的保留率最高, 抗氧化活性最显著($P < 0.05$)。绿茶面条在不同消化阶段中多酚的释放规律表明, 多酚在胃消化阶段释放的含量最高, 小肠消化阶段释放的含量最低, 其中冷冻熟面中多酚释放量最高。进一步分析消化中多酚单体变化规律, EGCG 和 ECG 在整个消化过程的降低幅度最大, EGC 和 EC 的小肠消化阶段的生物可及性较高。这些结果表明采用冷冻熟面加工方式更有利于绿茶面条中多酚在加工和食用过程中的稳定性, 可为绿茶面条功能特性的提升提供理论参考和应用基础。

© The Author(s) 2025. 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] 孟凡娜, 孙一凡, 刘坡, 等. 蓝靛果多酚提取物对小麦淀粉及面条品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 135(7): 1-12. [MENG F N, SUN Y F, LIU P, et al. Effect of *Lonicera caerulea* berry polyphenol extract on wheat starch and the quality of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 135(7): 1-12.]
- [2] 贝力克孜·麦麦提, 买尼沙木·亚生, 韩松林. 绿茶中茶多酚的生物活性及其在食品中的应用[J]. 食品安全导刊, 2024(26): 159-161. [BERIKIZ M, MAHNISAMU Y, HAN S L. Bioactivity of tea polyphenols in green tea and their application in food[J]. China Food Safety Magazine, 2024(26): 159-161.]
- [3] NJELEKELA M, YAMORI Y, NEGISHI H, et al. Black and

green tea polyphenols attenuate blood pressure increases in stroke-prone spontaneously hypertensive rats[J]. *The Journal of Nutrition*, 2004, 134(1): 38-42.

- [4] TAUBERT D, ROESEN R, SCHÖMING E. Effect of cocoa and tea intake on blood pressure: A meta-analysis[J]. *Archives of Internal Medicine*, 2007, 167(7): 626-634.
- [5] SHARMA A, ZHOU W. A stability study of green tea catechins during the biscuit making process[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(2): 568-573.
- [6] SIRIPATRAWAN U, NOIPHA S. Active film from chitosan incorporating green tea extract for shelf life extension of pork sausages[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 27(1): 102-108.
- [7] YANG C S, WANG X, LU G, et al. Cancer prevention by tea: A nimal studies, molecular mechanisms and human relevance[J]. *Nature Reviews Cancer*, 2009, 9(6): 429-439.
- [8] YU K, HUANG X X, HE W, et al. Evaluation of the effects of thermal processing on antioxidant activity and digestibility of green tea noodles: Based on polyphenol stability and starch structure[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 114: 103780.
- [9] HENNING S M, NIU Y, LEE N H, et al. Bioavailability and antioxidant activity of tea flavanols after consumption of green tea, black tea, or a green tea extract supplement[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, 80(6): 1558-1564.
- [10] PETERS C M, GREEN R J, JANLE E M, et al. Formulation with ascorbic acid and sucrose modulates catechin bioavailability from green tea[J]. *Food Research International*, 2010, 43(1): 95-102.
- [11] 张梁, 陈欣, 陈博, 等. 茶多酚体内吸收、分布、代谢和排泄研究进展[J]. 安徽农业学报, 2016, 43(5): 667-675. [ZHANG J, CHEN X, CHEN B, et al. Research progress in the absorption, distribution, metabolism and excretion of tea polyphenols *in vivo*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2016, 43(5): 667-675.]
- [12] 蒲华寅, 尹志慧, 呼矿矿, 等. 预制面条制作过程中品质变化研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 76-83. [PU H Y, YIN Z H, HU K K, et al. Analysis of quality in preprocessed noodles during the producing process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 76-83.]
- [13] HUANG R, HUANG K, GUAN X, et al. Incorporation of de-fatted quinoa flour affects *in vitro* starch digestion, cooking and rheological properties of wheat noodles[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 108: 103542.
- [14] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus[J]. *Food & Function*, 2014, 5(6): 1113-1124.
- [15] 辛相余. 黑豆芽多酚体外模拟消化的生物可及性及其对消化酶的抑制作用研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2022. [XIN X Y. Study on the bioavailability of polyphenols from black bean sprouts for *in vitro* simulated digestion and their inhibitory effect on digestive enzymes[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2022.]
- [16] LEVENT H. Effect of partial substitution of gluten-free flour mixtures with chia (*Salvia hispanica* L.) flour on quality of gluten-free noodles[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54: 1971-1978.
- [17] CHEN Y, QIN L, WEN A, et al. Three-solvent extracting method comprehensively evaluates phenolics profile and antioxidant activities of Tartary buckwheat[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(1): e15020.
- [18] XU S, QIN L, MAZHAR M, et al. Functional components profile and glycemic index of kidney beans[J]. *Frontiers in Nutri-*

tion, 2022, 9: 1044427.

- [19] LI S, WANG A, LIU L, et al. Extraction of polysaccharides under vacuum condition from *Lentinus edodes* stipe and their antioxidant activities *in vitro*[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28: 759–767.
- [20] ZHU F, SAKULNAK R, WANG S. Effect of black tea on antioxidant, textural, and sensory properties of Chinese steamed bread[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 1217–1223.
- [21] SMOLAKAITĖ L, VENSKUTONIS P R, TALOU T. Comprehensive evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of different mushroom species[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 462–471.
- [22] BUSTOS M C, VIGNOLA M B, PÉREZ G T, et al. *In vitro* digestion kinetics and bioaccessibility of starch in cereal food products[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 77: 243–250.
- [23] PADALINO L, COSTA C, CONTE A, et al. The quality of functional whole-meal durum wheat spaghetti as affected by inulin polymerization degree[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 173: 84–90.
- [24] SUDLAPA P, SUWANNAPORN P. Dual complexation using heat moisture treatment and pre-gelatinization to enhance starch-phenolic complex and control digestibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108280.
- [25] 余世锋, 马莺. 米饭品质影响因素及其老化机制研究进展[J]. *食品工业科技*, 2008(12): 285–288. [YU S F, MA Y. Research progress of the effect factors of quality and stalling mechanisms of cooked rice[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008 (12): 285–288.]
- [26] 贺平. 低温预冷对糯米淀粉凝胶老化特性的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016. [HE P. Effects of low temperature on retrogradation of waxy rice starch gel[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.]
- [27] 马晓军, 王睿, 耿敏, 等. 即食方便米饭的老化机理及影响因素研究[J]. *食品与发酵工业*, 2008, 34(7): 37. [MA X J, WANG R, GENG M, et al. Study on the aging mechanism and influencing factors of instant convenient rice[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2008, 34(7): 37.]
- [28] HARAKOTR B, SURIHARN B, TANGWONGCHAI R, et al. Anthocyanin, phenolics and antioxidant activity changes in purple waxy corn as affected by traditional cooking[J]. *Food Chemistry*, 2014, 164: 510–517.
- [29] 邓余良, 袁海波, 许勇泉, 等. 名优绿茶鲜叶摊放微域环境自控系统的设计与开发[J]. *中国茶叶*, 2011(3): 15–16. [DENG Y L, YUAN H B, XU Y Q, et al. Design and development of a micro domain environmental self-control system for fresh green tea leaf stalls[J]. *China Tea*, 2011(3): 15–16.]
- [30] WANG J R, LIU C, WANG X J, et al. Regulating the quality and starch digestibility of buckwheat-dried noodles through steam treatment[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2024, 195: 115826.
- [31] ZHANG Y, CHEN Y, CHEN J. The starch hydrolysis and aroma retention caused by salivary α -amylase during oral processing of food[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 43: 237–245.
- [32] WANG L, WANG L, LI Z, et al. Diverse effects of rutin and quercetin on the pasting, rheological and structural properties of tartary buckwheat starch[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127556.
- [33] YU M, ZHU S, ZHONG F, et al. Insight into the multi-scale structure changes and mechanism of corn starch modulated by different structural phenolic acids during retrogradation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 128: 107581.
- [34] MADHUJITH T, SHAHIDI F. Antioxidant potential of barley as affected by alkaline hydrolysis and release of insoluble-bound phenolics[J]. *Food Chemistry*, 2009, 117(4): 615–620.
- [35] TENORE G C, CAMPIGLIA P, GIANNETTI D, et al. Simulated gastrointestinal digestion, intestinal permeation and plasma protein interaction of white, green, and black tea polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2015, 169: 320–326.
- [36] SHIM S M, YOO S H, RA C S, et al. Digestive stability and absorption of green tea polyphenols: Influence of acid and xylitol addition[J]. *Food Research International*, 2012, 45(1): 204–210.
- [37] 乔小燕, 操君喜, 车劲, 等. 不同贮藏年份康砖茶主要成分差异及其抗氧化活性比较[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 48–55. [QIAO X Y, CAO J X, CHE J, et al. Comparative analysis on chemical components and antioxidant activity for different aged kang bricks teas[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 48–55.]
- [38] 任淑萌. 阿魏酸的降解作用规律和机理研究及其在药物质量控制中的应用[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2009. [REN S M. Study on the rule and mechanism of degradation of ferulic acid and its application in drug quality control[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2009.]
- [39] ANANINGSIH V K, SHARMA A, ZHOU W. Green tea catechins during food processing and storage: A review on stability and detection[J]. *Food Research International*, 2013, 50(2): 469–479.
- [40] NEILSON A P, HOPF A S, COOPER B R, et al. Catechin degradation with concurrent formation of homo- and heterocatechin dimers during *in vitro* digestion[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(22): 8941–8949.
- [41] HE Q, LÜ Y, YAO K. Effects of tea polyphenols on the activities of α -amylase, pepsin, trypsin and lipase[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(3): 1178–1182.
- [42] XUE C, SAKAI N, FUKUOKA M. Use of microwave heating to control the degree of starch gelatinization in noodles[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 87(3): 357–362.
- [43] WANG Z X, LIN Q Q, TU Z C, et al. The influence of *in vitro* gastrointestinal digestion on the perilla frutescens leaf extract: Changes in the active compounds and bioactivities[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(12): e13530.
- [44] RAVICHANDRAN K, AHMED A R, KNORR D, et al. The effect of different processing methods on phenolic acid content and antioxidant activity of red beet[J]. *Food Research International*, 2012, 48(1): 16–20.
- [45] BOUAYED J, HOFFMANN L, BOHN T. Total phenolics, flavonoids, anthocyanins and antioxidant activity following simulated gastro-intestinal digestion and dialysis of apple varieties: Bioaccessibility and potential uptake[J]. *Food Chemistry*, 2011, 128(1): 14–21.