胡方洋, 张得祥, 冯淑玉, 等. 芒果粉体外吸附能力与消化特性综合评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 21−33. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080325

HU Fangyang, ZHANG Dexiang, FENG Shuyu, et al. Comprehensive Evaluation of *in Vitro* Adsorption Capacity and Digestive Properties of Different Mango Powders[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 21−33. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080325

·特邀主编专栏—果蔬基料制造: 基础理论、新型加工、质量控制与智能制造（客座主编: 徐贞贞、王永涛、李涛; 产业顾问: 李仁杰）·

芒果粉体外吸附能力与消化特性综合评价

胡方洋[1,2,3], 张得祥[1,2,3], 冯淑玉[2], 刘彩华[1,2,3], 朱正杰[1,2,3,*]

（1.广西芒果生物学重点实验室, 广西百色 533000;
2.百色学院农业与食品工程学院亚热带特色农产品保鲜及综合利用广西高校工程研究中心, 广西百色 533000;
3.亚热带特色农业产业学院, 广西百色 533000）

摘　要: 为探讨不同部位芒果粉体外吸附胆酸盐能力与消化特性，挖掘芒果粉健康潜力。以‘台农’‘金煌’‘象牙’和‘桂七’芒果为原料分别制备果皮、果肉和果核粉，研究不同部位芒果粉膳食纤维含量、颗粒形态、体外吸附水分、油脂、胆固醇及胆酸盐能力与体外消化特性，并进行相关性与主成分分析。结果表明，芒果粉总膳食纤维含量为 42.97~83.75 g/100 g，不溶性膳食纤维占比 84% 以上，‘台农’核粉的不溶性膳食纤维最高可达 81.26 g/100 g。同一品种中芒果皮粉粉体分散，吸水能力相对最高；不同品种中‘象牙’粉粒径分布均匀集中，‘象牙’皮粉的吸水能力显著最高为 3.28 g/g（P<0.05），‘象牙’核粉的吸油能力、胆酸盐吸附能力也显著最高（P<0.05）。4 种芒果中果皮与果核粉体外消化率与 eGI 均较果肉粉低。体外消化 180 min 后，果皮与果核中的消化率和 eGI 仅为 6.08%~37.77% 和 43.05~60.45；果皮与果核粉体外消化率和 eGI 均为象牙>桂七>金煌>台农。相关性分析和主成分分析结果表明芒果粉尤其果皮与果核粉中不溶性膳食纤维含量影响其体外吸附胆酸盐能力和消化特性，4 个品种中‘象牙’芒果粉具有较好的吸附能力和消化特性，各部位指标综合评分排名第 1，而‘台农’综合评分最低。可将芒果粉不同性质特性应用至食品行业中，拓展芒果及其副产物的利用。

关键词: 芒果粉, 膳食纤维, 胆酸盐吸附能力, 体外消化

中图分类号: TS255.42　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0021−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080325　　本文网刊:

Comprehensive Evaluation of *in Vitro* Adsorption Capacity and Digestive Properties of Different Mango Powders

HU Fangyang[1,2,3], ZHANG Dexiang[1,2,3], FENG Shuyu[2], LIU Caihua[1,2,3], ZHU Zhengjie[1,2,3,*]

（1.Guangxi Key Laboratory of Biology for Mango, Baise 533000, China;
2.University Engineering Research Center for Preservation and Comprehensive Utilization of Subtropical Characteristic Agricultural Products in Guangxi, College of Agriculture and Food Engineering, Baise University, Baise 533000, China;
3.Industrial College of Subtropical Characteristic Agriculture, Baise 533000, China）

Abstract: This study aimed to investigate the *in vitro* bile salt adsorption capacity and digestive properties of mango powders from different parts to explore their health potential. Powders from the peel, sarcocarp, and kernel of four mango cultivars ('Tainong' 'Jinhuang' 'Xiangya' 'Guiqi') were prepared. Their dietary fiber content, particle morphology, *in vitro* adsorption capacities for water, oil, cholesterol, and bile salts, along with *in vitro* digestibility, were studied, followed by correla-

收稿日期: 2025−09−01

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2024KY0756）; 亚热带特色农产品保鲜及综合利用工程研究中心建设项目（桂教科研〔2024〕10 号）; 广西重点研发计划（桂科 AB24010275）; 广西八桂青年拔尖人才计划项目（朱正杰）。

作者简介: 胡方洋（1996−）, 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 亚热带果蔬资源综合利用, E-mail: 18076143208@163.com。

*** 通信作者:** 朱正杰（1983−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 土壤环境质量、芒果资源开发利用, E-mail: zhuzhjie@163.com。

tion and principal component analysis. The results showed that the total dietary fiber content of mango powders ranged from 42.97 to 83.75 g/100 g, with insoluble dietary fiber accounting for over 84%. The kernel powder of 'Tainong' had the highest insoluble dietary fiber content, reaching 81.26 g/100 g. Within the same cultivar, peel powders exhibited good dispersion and the highest water absorption capacity. Among different cultivars, 'Xiangya' powders showed a uniform and concentrated particle size distribution. The 'Xiangya' peel powder had the significantly highest water absorption capacity (3.28 g/g, $P < 0.05$), while the 'Xiangya' kernel powder also exhibited the significantly highest oil absorption and bile salt adsorption capacities ($P<0.05$). The *in vitro* digestibility and estimated glycemic index (eGI) of peel and kernel powders were lower than those of sarcocarp powders across all four cultivars. After 180 minutes of *in vitro* digestion, the digestibility and eGI of peel and kernel powders were only 6.08%~37.77% and 43.05~60.45, respectively, with the order of *in vitro* digestibility and eGI for peel and kernel powders being 'Xiangya'>'Guiqi'>'Jinhuang'>'Tainong'. Correlation and principal component analyses indicated that the insoluble dietary fiber content in mango powders, particularly in peel and kernel powders, influenced their *in vitro* bile salt adsorption capacity and digestive properties. Among the four cultivars, 'Xiangya' mango powder demonstrated superior adsorption capacity and digestive characteristics, ranking first in the comprehensive evaluation of indicators across different parts, while 'Tainong' had the lowest overall score. These findings suggest the potential application of mango powders with varied functional properties in the food industry, thereby expanding the utilization of mango and its by-products.

Key words: mango powder; dietary fiber; bile salts adsorption capacity; *in vitro* digestibility

芒果(*Mangifera indica* L.)又名杧果,是漆树科芒果属的热带亚热带常绿果树,具有抗旱耐瘠、速生易长、适应性广泛的特点,与香蕉、柑桔、苹果和葡萄并称为世界五大水果,芒果因其较高的营养价值和独特风味而被称为“热带水果之王”[1−2]。芒果属于呼吸跃变型果实且采收期高温高湿[3−4],采后芒果果实呼吸代谢旺盛,极易发生腐烂变质造成鲜果保质期短。为减少芒果采后因储藏不当造成的资源浪费问题,除鲜食外应不断积极探索芒果精深加工途径。芒果粉是新鲜芒果经干燥脱水、粉碎等工艺制成,具有体积小、水分含量低、运输方便等优势,广泛应用于果汁饮料、面包和冰淇淋等食品加工中赋予食品更为丰富的口感与营养[5]。

目前,对芒果粉的研究主要集中于芒果粉的制备及其粉体特性,且主要以芒果果肉为主。如李丹彤[6]研究了芒果成熟度对其制粉效果的影响发现,低成熟度的芒果果实糖分含量最低,营养成分含量最高,采用真空结合超低温粉碎后得到的芒果粉品质最好。沈乔眉等[7]研究普通粉碎、球磨粉碎和振动粉碎工艺对芒果粉理化性质与结构性质影响发现,不同制粉工艺未破坏芒果粉组成分子的主要结构,但球磨粉碎 2 h 和振动粉碎 7 min 处理有效延缓芒果粉吸湿,增加了溶解性和持油性。而芒果皮与芒果核作为芒果加工剩余物,分别占鲜果的 15%~20%[8] 和 30%~45%[9],因含有丰富营养物质如膳食纤维、矿物质、酚类化合物等活性成分而具有抗氧化、促进肠道健康、抗菌消炎等生理功能[2]。目前芒果皮与芒果核多是直接丢弃或用于堆肥和制作饲料,加工利用不足且附加值低。也有少量研究芒果皮添加对芒果粉及产品性质的影响,如许佳林等[10]在芒果果肉超微粉中添加 8%~24% 芒果皮发现,随着果皮添加的增大,芒果超微粉 D_{50} 逐渐升高,粒径分布更均匀,且芒果超微粉中的总酚、总黄酮、抗坏血酸等活性成分含量升高。进一步比较芒果香精、市售冻干粉和含果皮超微粉对冰淇淋营养与品质影响发现,含果皮超微粉不仅提高了冰淇淋总酚、总黄酮等活性成分含量和抗氧化能力,且在风味上与添加冻干芒果粉的冰淇淋无明显差异,明显优于香精组[11]。这表明芒果皮粉具有开发功能性食品的潜力。

胆汁酸是胆汁的主要成分,具有促进脂质消化吸收、抑制胆汁中胆固醇析出和调节糖和脂类代谢的功能[12]。大多数胆汁酸会与钠离子或钾离子结合生成胆酸盐如胆酸钠、牛黄胆酸钠等形式存在[13]。研究表明,膳食纤维可吸附胆酸盐减少其重吸收,进而迫使肝脏利用更多的胆固醇合成新的胆汁酸以达到降脂的目的[14]。芒果粉中含有丰富膳食纤维[15],但不同品种与不同部位间芒果粉膳食纤维含量差异如何鲜有报道,直接利用芒果粉能否吸附胆酸盐尚不清楚。此外,食品生物利用率受其消化特性影响,探究芒果果皮与果核粉的消化特性,对充分利用芒果资源、拓展芒果及其副产物的加工利用具有重要意义。

故本文以‘台农’(Tainong, TN)、‘金煌’(Jinhuang, JH)、‘象牙’(Xiangya, XY)和‘桂七’(Guiqi, GQ)芒为原料,分别研究果皮粉、果肉粉与果核粉中膳食纤维含量,体外吸附水分、油脂、胆固醇以及胆酸盐等的能力与体外消化特性,并对测定指标进行综合分析,探究芒果粉体外吸附与消化特性,为芒果粉在食品中的加工与应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

芒果(TN、JH、XY、GQ) 七成熟,百色市售;SGF 人工胃液(模拟液,无菌)、人工唾液(人造唾液唾沫中性)、SIF 人工肠液(模拟液,无菌)、牛磺胆酸钠 分析纯,合肥博美生物科技有限责任公司;CLS 胆固醇标准品、葡萄糖含量试剂盒 南京建成生物工程研究所有限公司;磷酸缓冲溶液、硫酸、氢

氧化钠、邻苯二甲醛、冰乙酸　分析纯，西陇科学股份有限公司。

DHG-9030 电热鼓风干燥箱　南京盈鑫实验仪器有限公司；JA2003 电子精密分析天平　武汉美睿仪器有限公司；PHS-3C pH 计　上海精科仪器有限公司；QL-861 振荡器　海门市其林贝尔仪器制造有限公司；HL-6KS 小型离心机　上海希言科学仪器有限公司；TMR-100 全自动多功能酶标仪　上海测博生物科技发展中心；HH-4 数显恒温水浴锅　国华电器有限公司；BT-9300SE 激光粒度分析仪　丹东百特仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　芒果粉的制备　以 TN 为例，取新鲜无明显病害的六至七成熟芒果，将果皮、果肉、果核分离，分别置于电热鼓风干燥箱（70 ℃）中干燥至恒重，粉碎，过 60 目筛后，得到 TN 果皮粉、TN 果肉粉和 TN 果核粉，分别记为 TN-P、TN-S 和 TN-K，密封保存备用。同理制得不同品种、不同部位的芒果粉 JH-P、JH-S、JH-K，XY-P、XY-S、XY-K 和 GQ-P、GQ-S、GQ-H。

1.2.2　膳食纤维含量测定　参照 GB 5009.88-2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》[16] 的方法，测定芒果粉中的不溶性膳食纤维（Insoluble Dietary Fiber，IDF）和可溶性膳食纤维（Soluble Dietary Fiber，SDF），含量按下式计算：

$$IDF(g/100\ g)=\frac{m_{沉淀}}{m_{样}}\times 100$$

$$SDF(g/100\ g)=\frac{m_{醇沉}}{m_{样}}\times 100$$

式中：$m_{沉淀}$为酶解后离心沉淀干燥后质量，g；$m_{样}$为样品质量，g；$m_{醇沉}$为酶解后离心上清液醇沉后沉淀干燥质量，g。

1.2.3　粒径测定　采用激光粒度分析仪，以水为介质测定样品粒径。测定参数：超声时间 1 min，折射率 1.53，转速 1600 r/min。3 次平行。

1.2.4　颗粒形态测定　取适量样品分散在导电胶上，喷金后置于 8.0 kV 加速电场 1000 倍下观察样品的 SEM 颗粒形态。

1.2.5　体外吸水与吸油能力测定　参照 Ma 等[17] 的方法，样品按质量比分别与蒸馏水和大豆油以 1∶10 混合均匀后，37 ℃ 水浴吸附 2 h，4000 r/min 离心 10 min，弃上层液取沉淀称重，按下式计算样品体外吸水能力（Water Absorbing Capacity，WAC）与吸油能力（Oil Absorbing Capacity，OAC）：

$$WAC(g/g)=\frac{m_{水沉淀}-m_{样}}{m_{样}}$$

$$OAC(g/g)=\frac{m_{油沉淀}-m_{样}}{m_{样}}$$

式中：$m_{水沉淀}$与 $m_{油沉淀}$分别为离心后弃上层水、油后的沉淀质量，g；$m_{样}$为样品质量，g。

1.2.6　体外吸附胆固醇能力测定　参考 Li 等[18] 的方法，取新鲜鸡蛋蛋黄，加入 9 倍体积蒸馏水，搅成乳液状。取 25 g 稀释后的蛋黄液加入 1.0 g 芒果粉样品，调节 pH7.0 后 37 ℃ 水浴 2 h，于 4000 r/min 下离心 20 min 后取上清液，用胆固醇试剂盒测定上清液中胆固醇的含量。体外吸附胆固醇能力（Cholesterol Absorbing Capacity，CAC）按下式计算：

$$CAC(mg/g)=(C_0-C)\times\frac{v}{m}$$

式中：C_0 为空白组上清液胆固醇浓度，mg/mL；C 为芒果粉吸附后上清液胆固醇浓度，mg/mL；v 为吸附后上清液体积，mL；m 为芒果粉质量，g。

1.2.7　体外吸附胆酸盐能力测定　参照于美汇等[19] 的方法。以 0.1 mol/L pH6.3 磷酸盐缓冲溶液分别配制 0.3 mmol/L 和 1 mmol/L 胆酸钠（Sodium Cholate，SC）和牛磺胆酸钠（Sodium Taurocholate，ST）标准溶液，绘制胆酸钠和牛磺胆酸钠标准曲线的回归方程分别为 y=0.0466x+0.0001，R^2=0.9994 和 y=14.3762x+0.0076，R^2=0.9993。取样品 0.1 g，以 0.1 mol/L NaOH 调 pH6.3 后依次加入 0.1 mol/L 人工胃液和 5 mL 人工肠液，37 ℃ 振荡消化 1 h。消化后，加入 4 mL 胆酸盐溶液在 37 ℃ 振荡吸收 1 h，吸附后样液移至离心管内，4000 r/min 离心 20 min，取上清液测定胆酸盐含量，3 次平行。体外吸附胆酸钠能力（Sodium Cholate Absorbing Capacity，SCAC）和牛磺胆酸钠能力（Sodium Taurocholate Absorbing Capacity，STAC）按下式计算：

$$SCAC(mg/g)=\frac{m_{SC}-C_{SC}\times V_{SC}}{m_{样}}$$

$$STAC(mg/g)=\frac{m_{ST}-C_{ST}\times V_{ST}}{m_{样}}$$

式中：m_{SC} 与 m_{ST} 分别为样品中加入胆酸钠与牛磺胆酸钠的质量，mg；C_{SC} 与 C_{ST} 分别为上清液中胆酸钠与牛磺胆酸钠的浓度，mg/mL；V_{SC} 与 V_{ST} 分别为吸附胆酸钠与牛磺胆酸钠后上清液体积，mL；$m_{样}$为样品质量，g。

1.2.8　体外消化能力测定　参照文献的方法[20] 修改，取 0.1 g 芒果粉与蒸馏水进行 1∶1 漩涡混合后加入 1 mL 无菌人工唾液，37 ℃ 匀浆 20 s 后加入 5 mL 无菌人工胃液，37 ℃ 振荡水浴 30 min，用 0.02 mol/L NaOH 来中和样液终止胃消化，随后加入 25 mL 0.2 mol/L 的醋酸钠缓冲溶液后摇匀，加入 5 mL 含有胰蛋白酶（6 μg/g）的无菌人工肠液继续在 37 ℃ 振荡水浴至 3 h 模拟肠道消化，分别在 0、10、30、60、90、120、180 min 时吸取 4 mL 消化液沸水浴灭酶停止消化。4000 r/min 离心 10 min 后用葡萄糖试剂盒测定上清液中的葡萄糖含量，参照 Goñi 等[21] 的方法计算芒果粉估计血糖生成指数（Estimated Glycemic Index，eGI）：

$$HI(\%)=\frac{G_t}{G_0}\times 100$$

$$eGI = 39.71 + 0.549HI$$

式中：HI 为芒果粉消化率，%；G_t 为消化 t 时刻样品中葡萄糖含量，mmol/L；G_0 为消化前样品中相当于葡萄糖含量，mmol/L。

1.3 数据处理

采用 Excel2019 对实验数据进行统计处理，采用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行单因素方差分析和主成分分析（Principal Component Analysis，PCA），Origin 2020Pro 绘图，相关性分析运用软件 Origin 2020Pro 中的 Correlation Plot 应用插件进行。所有数据均进行 3 次平行，实验数据以平均值±标准差形式体现。

2 结果与分析

2.1 膳食纤维含量

不同部位芒果粉膳食纤维含量及可溶性膳食纤维与不溶性膳食纤维含量占比见图 1。图 1 中，芒果皮、肉、核的 IDF 含量分别为 51.26~70.25、37.87~62.27、65.08~81.26 g/100 g，SDF 含量分别为 5.50~9.96、3.57~8.25、2.48~3.70 g/100 g。芒果粉可作为膳食纤维丰富来源，在 TN、JH、XY 和 GQ 中 IDF 占总膳食纤维 84% 以上，SDF 占比 3%~16%，且果皮与果核中 IDF 含量高于果肉，这与前期研究结果一致[22]。与其他品种相比，同一部位下 TN-P、TN-S、TN-K 的 IDF 含量均显著最高（$P<0.05$），SDF 含量最低，其次是 JH-P、JH-S、JH-K。这可能与不同品种芒果成熟时间[23]、成熟度[24] 以及产地[25] 等综合影响有关。

2.2 粒径分布

TN、JH、XY 和 GQ 芒果粉的粒径分布如图 2 所示。从图 2 中可看出芒果粉粒径呈单一分布峰，芒果皮、肉、核粉的粒径范围分别为 0.27~344.00、0.42~896.10、0.24~896.10 μm，果皮粉粒径分布较集中。芒果粉具体粒径分布参数见表 1，不同品种芒果粉的粒径大小存在差异，同一品种不同部位粒径也不同。对于 D10、D50 和 D90，果皮粉中分别为 3.48~7.09、19.01~38.12、60.19~131.30 μm，其中 JH-P 与 XY-P 的 D10、D50 和 D90 均较大，TN-P 显著最小（$P<0.05$）；果肉粉中 D10、D50 和 D90 分别为 4.75~13.50、25.07~106.87、70.90~419.80 μm，JH-S 显著最高（$P<0.05$），XY-S 最小，但与 TN-S 和 GQ-S 无明显差异；而果核粉中 D10、D50 和 D90 分别为 3.13~5.24、14.40~44.37、40.85~204.70 μm，4 个品种中 JH-K 的 D10、D50 和 D90 均最小（$P<0.05$）。这表明芒果粉粒径不仅受品种影响还与果实部位有关。体积平均粒径 D[4,3] 大小主要受大粒子影响，表面积平均粒径 D[3,2] 大小主要受小粒子影响[6]，故有表 1 中芒果粉 D[4,3] 大小变化与 D50、D90 一致，D[3,2] 与 D10 一致的结果。粒径越大，比表面积 S 越小[22,26]，在果实不同部位中 TN-P、XY-S、JH-K 的 S 最大分别为 301.70、218.43、334.67 m^2/kg。SPAN 为粉体离散度，SPAN 越小则芒果粉分散越均匀[27]。表 1 中同一部位不同品种间 SPAN 差异显著，XY-P、XY-S 和 XY-K 在不同部位间相对最小（$P<0.05$），XY 芒果粉粒径分布均匀；同一芒果品种中 SPAN 整体上为果核>果肉>果皮，芒果皮粉分布更均匀集中，与图 2 粒径分布一致。这可能是芒果肉粉与芒果核粉中含有小分子糖类物质如蔗糖、果糖、葡萄糖等易吸收水分使芒果粉聚集导致分散性较芒果皮差[28−30]。

2.3 颗粒形态

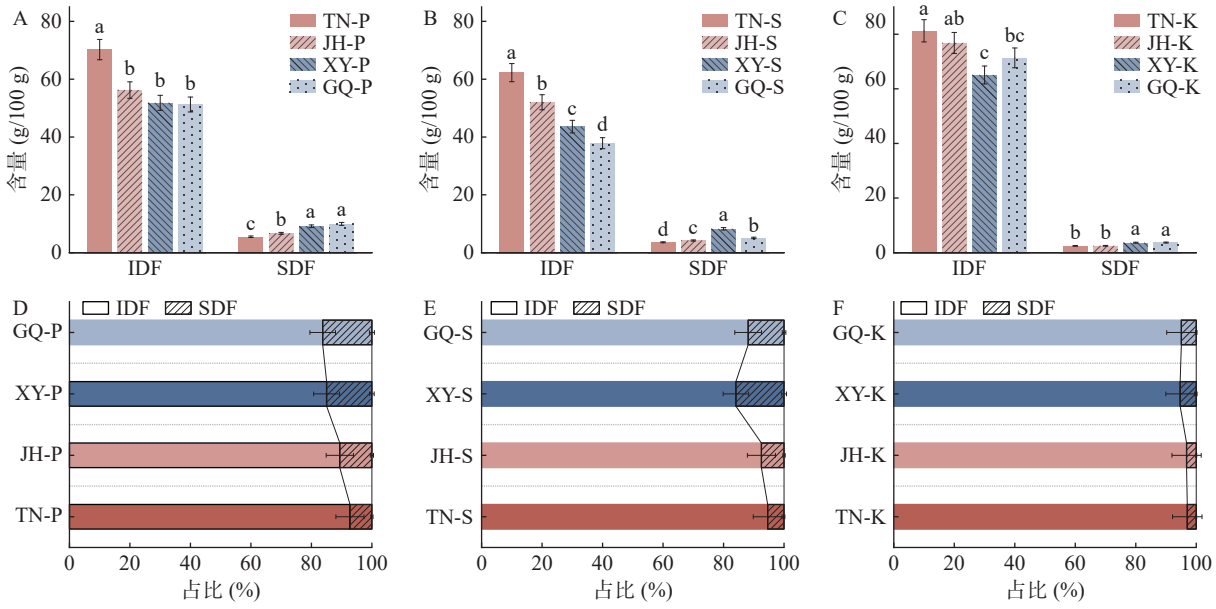


图 1 不同部位芒果粉的膳食纤维含量及占比

Fig.1 Dietary fiber content and proportion of mango powder from different parts

注：图中不同小写字母表示差异性显著（$P<0.05$）。

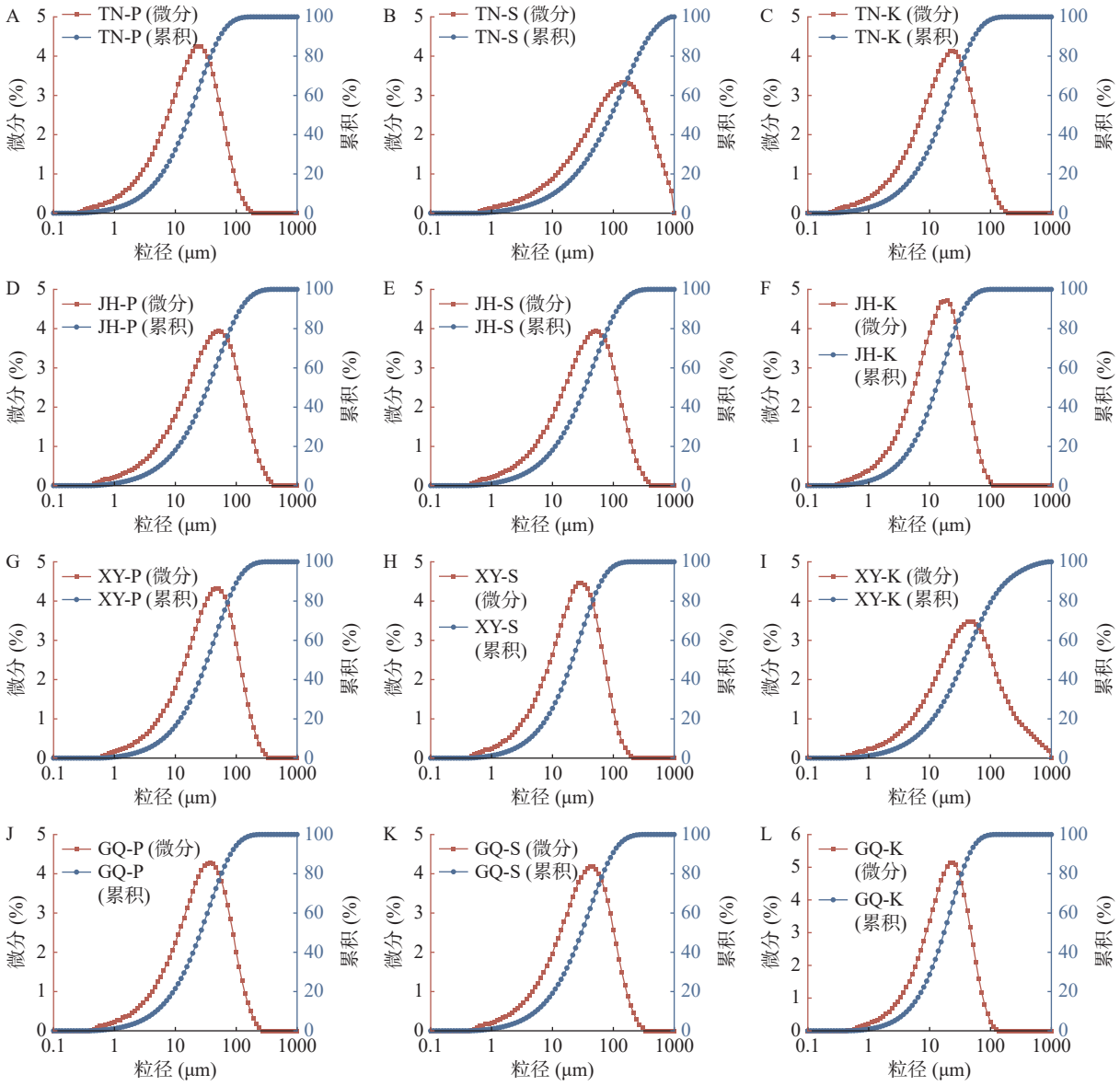


图 2　不同部位芒果粉的粒径分布

Fig.2　Particle size distribution of mango powder from different parts

表 1　不同部位芒果粉粒径参数

Table 1　Particle size parameters of mango powder from different parts

部位	样品	D10(μm)	D50(μm)	D90(μm)	D[4,3](μm)	D[3,2](μm)	S(m^2/kg)	SPAN
果皮	TN-P	3.48±0.00^{d}	19.01±0.00^{d}	60.19±0.00^{d}	26.61±0.00^{d}	7.37±0.00^{d}	301.70±0.00^{a}	2.98±0.00^{b}
	JH-P	6.11±0.01^{b}	38.12±0.14^{a}	131.30±0.35^{a}	56.37±0.22^{a}	12.94±0.04^{b}	171.70±0.46^{c}	3.29±0.00^{a}
	XY-P	7.09±0.06^{a}	37.34±0.30^{b}	115.13±1.58^{b}	51.42±0.52^{b}	14.96±0.50^{a}	146.87±2.11^{d}	2.90±0.02^{d}
	GQ-P	5.40±0.07^{c}	28.93±0.55^{c}	90.03±2.23^{c}	40.06±0.82^{c}	11.49±0.12^{c}	193.40±2.00^{b}	2.92±0.02^{c}
果肉	TN-S	4.97±0.08^{b}	30.93±0.90^{b}	106.40±4.00^{b}	45.72±1.61^{b}	10.47±0.14^{b}	212.20±2.80^{a}	3.29±0.04^{b}
	JH-S	13.50±1.18^{a}	106.87±11.84^{a}	419.80±48.27^{a}	168.97±17.82^{a}	27.70±2.30^{a}	80.61±7.02^{c}	3.80±0.02^{a}
	XY-S	4.75±0.08^{b}	25.07±2.85^{b}	70.90±2.21^{b}	32.09±0.86^{b}	10.17±0.16^{b}	218.43±3.31^{a}	2.79±0.02^{d}
	GQ-S	6.00±0.07^{b}	33.50±0.68^{b}	107.67±2.55^{b}	47.35±1.05^{b}	12.83±0.12^{b}	173.13±1.56^{b}	3.04±0.02^{c}
果核	TN-K	3.50±0.32^{c}	27.52±9.03^{b}	113.70±53.10^{b}	46.19±19.76^{b}	7.17±0.39^{c}	311.20±16.90^{b}	3.78±0.68^{b}
	JH-K	3.13±0.01^{d}	14.40±0.07^{c}	40.85±0.32^{c}	18.88±0.12^{c}	6.65±0.02^{d}	334.67±1.31^{a}	2.62±0.01^{c}
	XY-K	5.24±0.04^{a}	30.99±0.57^{b}	102.83±2.87^{b}	44.64±1.09^{b}	11.08±0.06^{a}	200.50±1.10^{d}	3.15±0.04b^{c}
	GQ-K	4.57±0.13^{b}	44.37±1.90^{a}	204.70±10.60^{a}	80.63±4.02^{a}	8.87±0.18^{b}	250.65±5.05^{c}	4.51±0.04^{a}

注：表中同列间不同小写字母表示芒果品种间差异性显著(P<0.05)。

对不同部位芒果粉进行 SEM 观察如图 3 所示。其中图 3A~图 3C 分别为果皮粉、果肉粉、果核粉颗粒形态。从图 3A 中可知，不同品种芒果皮粉相对分散，芒果粉颗粒表面褶皱呈不规则形状，纤维破碎[11]，其中 TN-P 与 GQ-P 颗粒形态较分散。图 3B 中芒果肉粉颗粒为圆形或椭圆形，颗粒形态完整，颗

粒之间由于含有糖类物质相互粘连成大小不一的块状[31−32]。这可能是导致图 2 中芒果肉粉粒径范围分布较宽、粒径较大的原因。图 3C 中，芒果核粉颗粒形态除破碎纤维和完整圆形或椭圆形颗粒外，还有长条棒状纤维。这可能与图 1 中芒果核粉膳食纤维含量最高有关，尤其 IDF 占比 95% 以上。不同品种间，同一部位芒果粉颗粒形态类似。

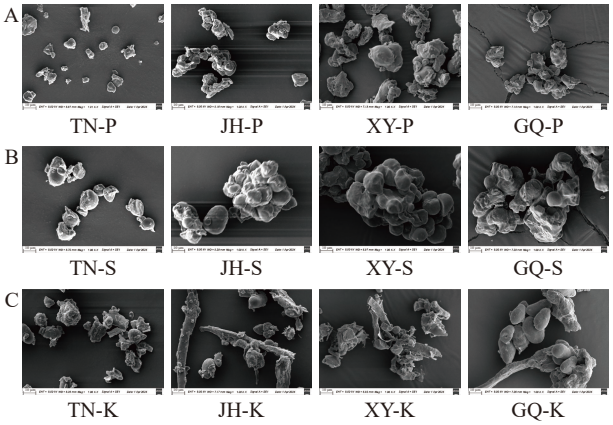


图 3 不同部位芒果粉 SEM 图(1000×)

Fig.3 SEM image of mango powder from different parts (1000×)

2.4 吸水与吸油能力

WAC 与 OAC 可反映芒果粉受外力作用下吸附水与油脂的能力[33]，具体见图 4。从图 4 中可知，芒果皮、肉、核粉的 WAC 与 OHC 分别为 2.18~3.28、1.05~1.62、1.46~2.48 g/g 与 0.87~1.35、1.27~1.58、1.02~1.74 g/g。4 个芒果品种中，WAC 为果皮粉>果核粉>果肉粉，而 OAC 则与 WAC 刚好相反为果肉粉>果核粉>果皮粉。这可能与果皮与果核中含有更高含量的膳食纤维有关(图 1)，膳食纤维具有大量的亲水基团可捕获更多水分[34]；且果皮与果核粉颗粒相对分散(图 2)、果皮粉颗粒表面褶皱(图 3)而暴露出更多的水结合位点，利于水分的保留[35]。同一部位中，不同品种芒果粉间 WAC 与 OAC 变化趋势类似，果皮粉中 TN-P 的 WAC 与 OAC 相对最低(P<0.05)，XY-P 的 WAC 最高，OAC 与 GQ-P、JH-P 无显著差异(P>0.05)；果肉粉中 XY-S 的 WAC 与 OAC 均相对最低(P<0.05)；而果核粉中 XY-K 则是最高(P<0.05)。

2.5 吸附胆固醇能力

体内胆固醇含量过高可能导致高脂血症，造成动脉粥样硬化、静脉血栓、胆石症等[36]。CAC 是反映样品体外降血脂能力重要指标，从图 5 中可知芒果粉在 pH7(模拟肠道环境)条件下的 CAC 为 5.62~7.21 mg/g。这表明芒果粉具有吸附胆固醇的能力，可降低机体胆固醇含量进而减少相关并发症的发生[37]。芒果粉 CAC 可能与其含有膳食纤维有关，膳食纤维可减少过量供给的胆固醇在小肠中的吸收和利用，膳食纤维对胆固醇吸附能力越强，机体对胆固醇的吸收越少，进而降低血胆固醇水平[38−39]。其中 TN-P、JH-P、XY-P、GQ-P 的 CAC 无明显差异，TN-S 显著低于 JH-S、XY-S 和 GQ-S，TN-K 与 XY-K 明显低于 JH-K 和 GQ-K。除膳食纤维外，CAC 可能还受芒果粉颗粒形态与分散程度等的影响。图 3B 中 TN-S 颗粒分散未聚集成块状减少了胆固醇束缚在芒果粉间的吸附，且图 3C 中 TN-K 与 XY-K 颗粒中长条棒状 IDF 破裂成碎片导致 IDF 多孔基质结构破坏[40]而影响胆固醇吸附。

2.6 吸附胆酸盐能力

SC 与 ST 是以肝内胆固醇为原料转变生成的胆汁酸与钠离子的结合物，是胆汁酸的主要存在形式[41]。芒果粉在体外模拟胃肠环境下对 SC 和 ST 吸附能力如图 6 所示。从图 6 可知芒果粉对 SC 与 ST 有明显吸附，芒果粉 SCAC 为 0.84~10.63 mg/g，STAC 为 3.83~20.80 mg/g，其中 JH-P、TN-S、XY-K 的 SCAC 与 STAC 在不同部位中分别最高，SCAC 分别为 8.09、9.19、10.63 mg/g，STAC 分别为 17.46、16.19、20.80 mg/g，而 GQ-P、XY-S 和 GQ-K 则最低，芒果粉 SCAC 与 STAC 趋势相似，且 STAC 优于 SCAC。芒果粉胆酸盐吸附能力可能与其含有丰富的膳食纤维有关，膳食纤维中的纤维素和果胶等物质可通过疏水相互作用和亲水相互作用结合胆酸盐形成复合物[42−43]。小肠中约 95% 以上的胆酸盐会经重吸收回血液并循环至肝脏[44]，芒果粉对胆酸盐吸附含量越高，在小肠中与胆酸盐结合成复合物后重吸收率降低，阻碍其循环返回肝脏，进而促进肝脏或血液

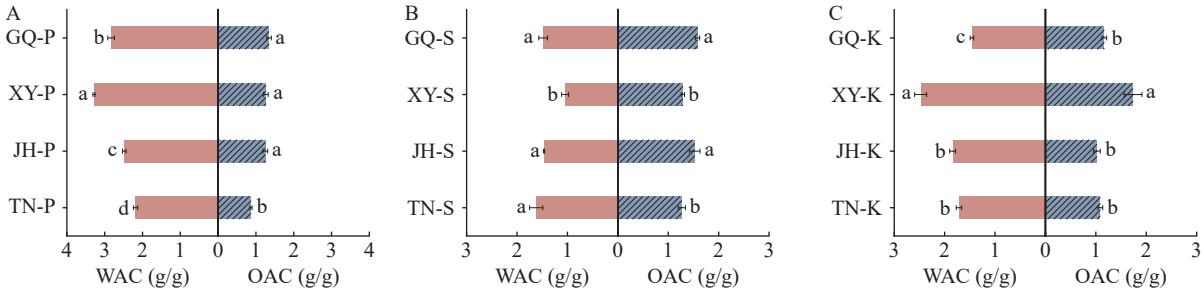


图 4 不同部位芒果粉吸水与吸油能力

Fig.4 Water absorption capacity and oil absorption capacity of mango powder from different parts

注：图中不同小写字母表示差异性显著(P<0.05)。

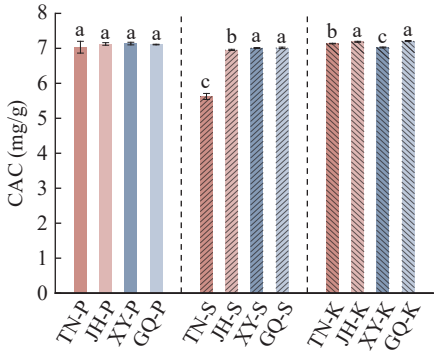


图 5　不同部位芒果粉胆固醇吸附能力

Fig.5　Cholesterol adsorption capacity of mango powder from different parts

注：图中不同小写字母表示同部位芒果品种间差异性显著（P<0.05）。

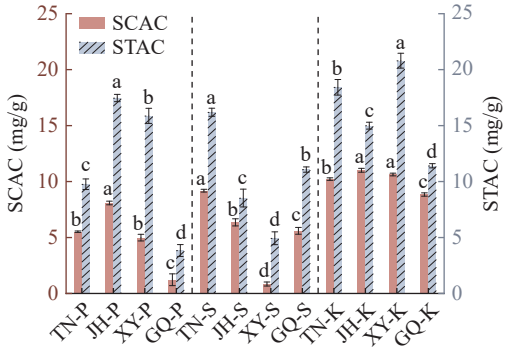


图 6　不同部位芒果粉胆酸钠与牛磺胆酸钠吸附能力

Fig.6　Adsorption capacity of sodium cholate and sodium taurocholate in mango powder from different parts

注：图中同指标间不同小写字母表示同部位芒果品种间差异性显著（P<0.05）。

中胆固醇降解生成更多的胆汁酸，达到降脂的目的。另一方面，芒果粉中的多糖物质与水分结合后黏度增加[45]可能束缚了更多的胆酸盐，这与图 4 中 TN-S 与 XY-K 的 WAC 最高的结果一致。此外，芒果粉 IDF 与 SDF 占比，颗粒形态与结构等也会影响胆酸盐吸附能力[46−48]。

2.7　体外消化性

芒果粉体外模拟消化情况如图 7 所示。从图 7 中可知，在 180 min 内随着消化时间的延长，芒果粉消化后葡萄糖含量显著升高（P<0.05），在 0~30 min 时葡萄糖含量升高较快，30~120 min 葡萄糖含量逐渐增加接近最高值，120~180 min 趋于平缓。TN、JH、XY、GQ 芒果粉 HI 与葡萄糖含量变化趋势一致，HI 从 0 min 时的 0.67%~42.49% 到 180 min 时

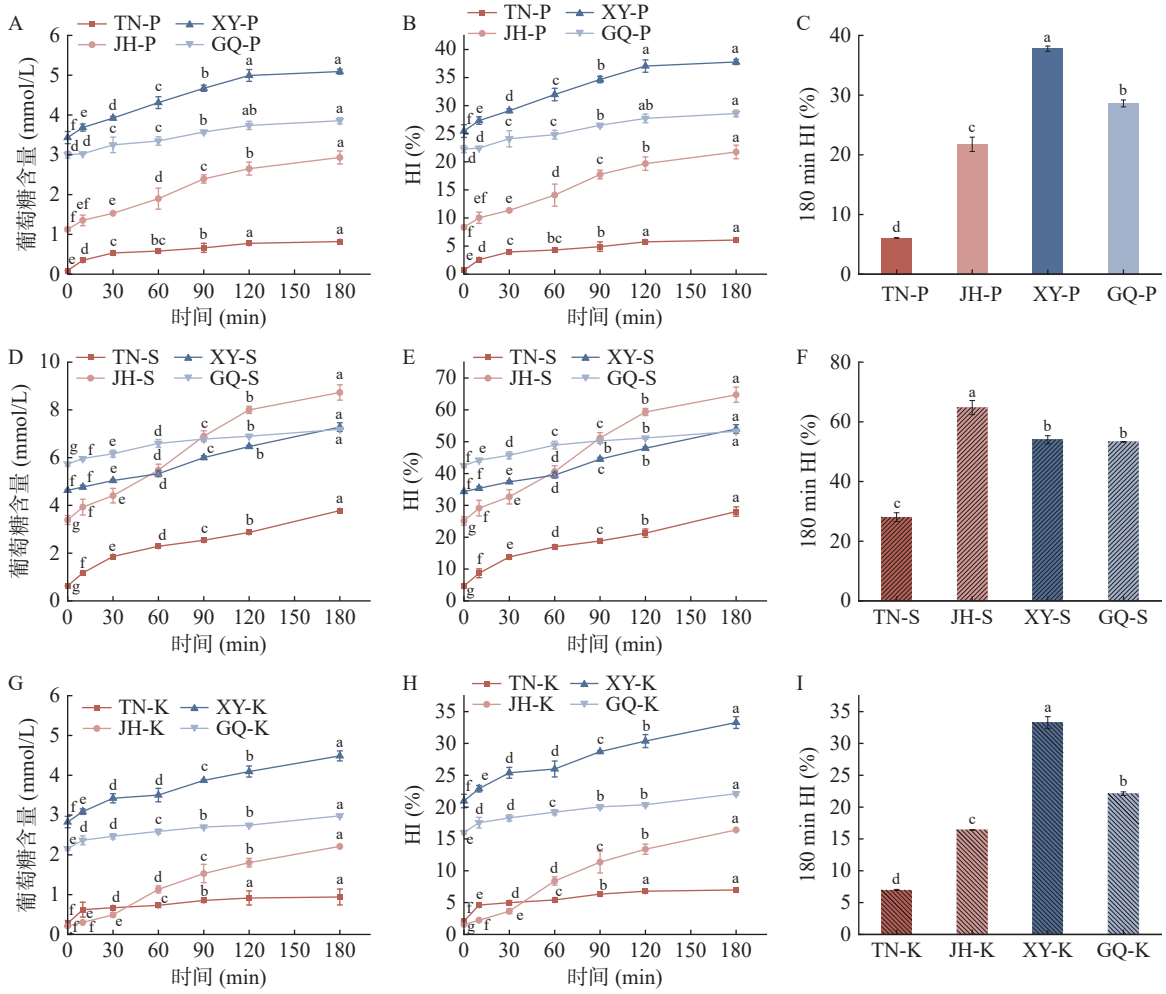


图 7　不同部位芒果粉体外消化率

Fig.7　*In vitro* digestibility of mango powder from different parts

注：图中不同小写字母表示差异性显著（P<0.05）。

仅升高至 6.08~53.29%, 消化程度较低。食物消化后会引起餐后血糖升高, 血糖升高速度与能力可用血糖生成指数(GI)反映。当 GI 值低于 55 时可将该食物称为低 GI 食物, 处于 55~75 间称为中 GI 食物, 而高于 75 则是高 GI 食物[49]。高 GI 食物在胃肠中消化快、吸收率高, 长期食用高 GI 食物会增加肥胖、糖尿病、高脂血症等一系列代谢疾病的发生[50]。

模拟体外消化的 GI 值可用 eGI 表示。TN、JH、XY、GQ 芒果粉体外消化后的 eGI 值见图 8。图 8 中, 芒果粉 eGI 在 0~180 min 的变化趋势与图 7 中葡萄糖含量和 HI 一致, eGI 与消化后葡萄糖含量和 HI 有关。在 180 min 时, 芒果粉 eGI 达到最大值, 不同品种下除 XY 外, 果皮与果核粉的 eGI 值低于 55; 其余除 JH-S 的 eGI 值为 75.26 略高于 75 外, 均在 55~75 间。这表明芒果粉可作为中低 GI 食物原料, 尤其果皮与果核。在果皮与果核粉中, 不同品种间芒果粉消化后葡萄糖含量、HI 与 eGI 均为 XY>GQ>JH>TN, 这与图 1 中 SDF 含量趋势一致。同一品种的不同部位中, 芒果粉消化后葡萄糖含量、HI 与 eGI 均为果肉>果皮>果核, 这与图 1 中 IDF 结果一致。IDF 不能被人体消化吸收, 也不参与糖代谢而无法提供葡萄糖[51] 而导致果皮与果核粉中消化后产生葡萄糖含量低。这表明芒果粉消化受品种与果实部位的影响, 且与其膳食纤维含量与种类有关。

2.8 芒果粉指标相关性分析

对芒果粉膳食纤维含量、粒径、吸附能力和消化特性 13 个指标进行相关性分析, 结果如图 9 所示。由图 9A 可知, 芒果粉中 IDF 与 SDF 含量、D[3,2]、OAC、180 min HI、180 min eGI 呈极显著负相关(P<0.01), 与 S、SCAC、STAC 呈极显著正相关(P<0.01); SDF 与 S、SPAN 呈显著负相关(P<0.05), 与 SCAC、STAC 呈极显著负相关(P<0.01), 与 WAC 呈极显著正相关(P<0.01)。这表明芒果粉中膳食纤维含量影响其颗粒粒径、吸附能力和消化特性, 且 IDF 与 SDF 对芒果粉指标的作用相反。芒果粉吸附能力与消化特性除与膳食纤维含量有关外, 还与颗粒粒径有关, D[4,3]、D[3,2] 越大 S 越小(P<0.01), OAC 与 WAC 越强(P<0.05), HI 与 eGI 越高(P<0.01)。从图 9B~图 9D 中可知, 同一部位芒果粉不同指标之间存在不同的相关性, 不同部位间指标相关性也不同。但不论果皮、果肉还是果核中, 芒果粉吸附能力与消化特性都与芒果粉中膳食纤维含量和粒径有关, 尤其是 IDF 含量。且 IDF 含量对芒果粉的影响在果皮粉与果核粉中更明显, 果皮与果核中 IDF 含量与 SDF 含量、D[3,2]、OAC、180 min HI、180 min eGI 的相关系数为−0.99~−0.83, 为极显著负相关(P<0.01)。

2.9 主成分分析

2.9.1 指标主成分提取及成分载荷矩阵 PCA 是一种将多个指标进行降维处理后得到少数保留绝大部分原始信息的主成分(Principal Component, PC)的降维算法, 与单一指标评价相比更加全面准确, 目前已广泛用于评价果蔬、谷物、茶叶等食品品质[52]。由于芒果粉不同指标之间存在单位与大小的差异会影响结果, 利用特征提取思维对芒果粉 13 个指标进行标准化处理后进行主成分分析, 主成分分析碎石图如图 10 所示。并对特征值>1 且累积方差贡献率较大的主成分进行提取见表 2。由图 10 和表 2 可知, 不同部位芒果粉特征值与方差贡献率不同, 其中芒果皮粉前 2 个主成分特征值分别为 7.92 和 3.39, 均大于 1, 且 PC1 与 PC2 的方差贡献率分别为 60.91%、

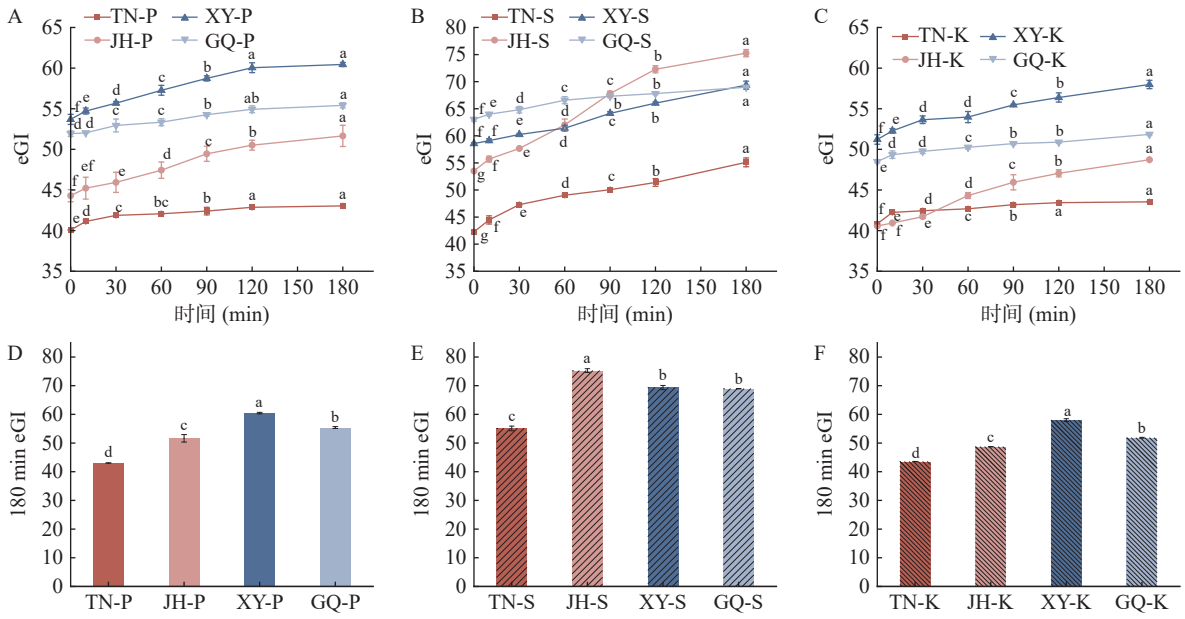


图 8 体外消化后不同部位芒果粉 eGI

Fig.8 eGI of mango powder from different parts after *in vitro* digestion

注: 图中不同小写字母表示差异性显著(P<0.05)。

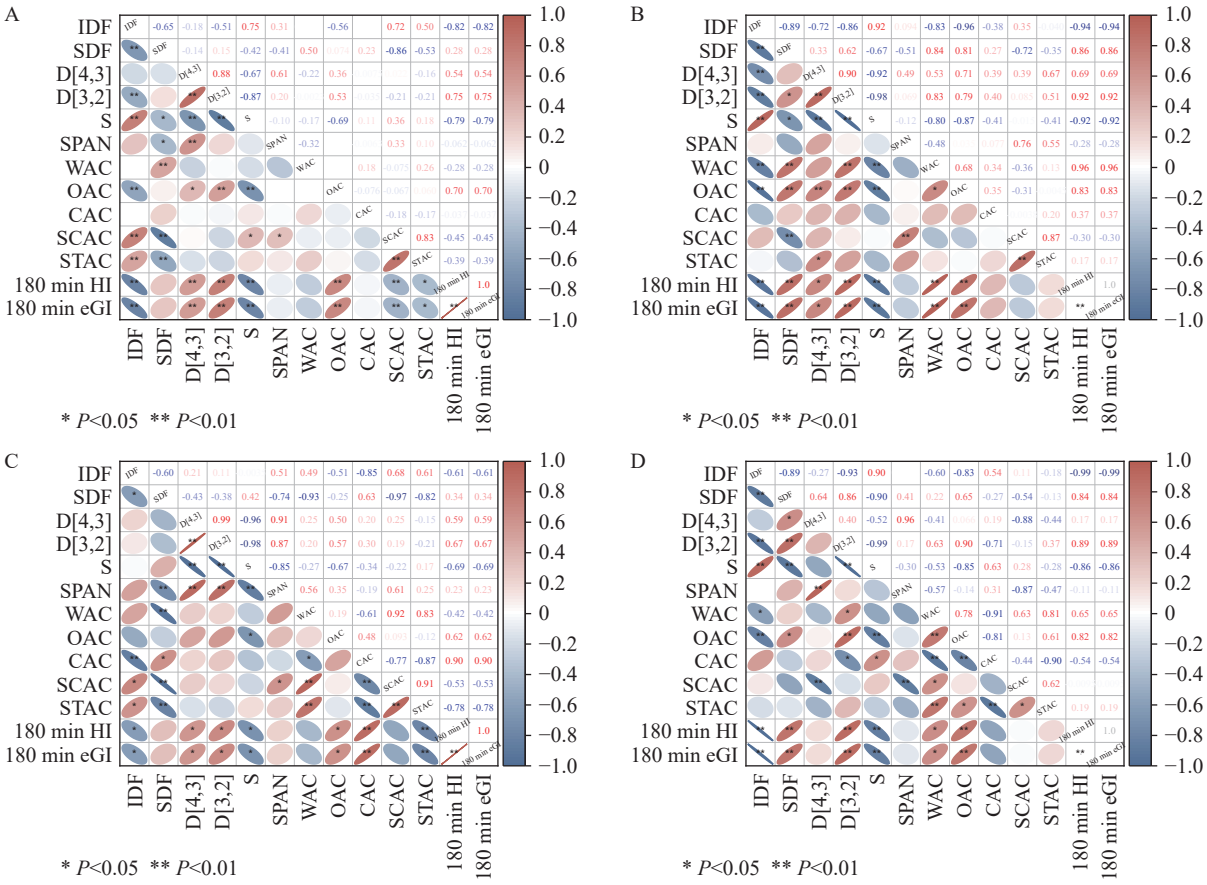


图 9　不同部位芒果粉测定指标间的相关性

Fig.9　Correlation among the measurement indicators of mango powder from different parts

注：A 为芒果粉指标整体相关性，B、C、D 分别为果皮、果肉、果核粉指标相关性。

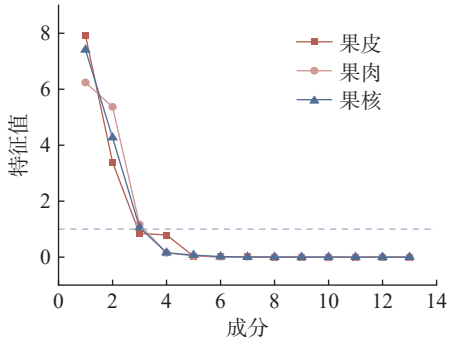


图 10　主成分分析碎石图

Fig.10　Screen plot for the PCA of mango powder

表 2　不同部位芒果粉主成分因子分析特征值与方差贡献率

Table 2　Eigenvalues and variance contribution rates of principal component factor analysis of mango powder from different parts

部位	成分	初始特征值		
		特征值	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)
果皮	PC1	7.92	60.91	60.91
	PC2	3.39	26.04	86.95
果肉	PC1	6.24	48.02	48.02
	PC2	5.37	41.30	89.32
	PC3	1.17	9.01	98.33
果核	PC1	7.41	57.01	57.01
	PC2	4.27	32.87	89.87
	PC3	1.06	8.16	98.03

26.04%，累积方差贡献率 86.95%；芒果肉粉与芒果核粉前 3 个主成分特征值分别为 6.24、5.37、1.17 与 7.41、4.27、1.06，PC1、PC2、PC3 的方差贡献率分别为 48.02%、41.30%、9.01% 与 57.01%、32.87%、8.16%，累积方差贡献率分别达到了 98.33% 和 98.03%。说明提取的主成分可以解释芒果粉大部分的原始标量信息。不同部位芒果粉累积贡献率差异与其提取的主成分数量有关，此外每个主成分与变量之间的关系也可能影响贡献率的不同。

主成分与变量之间的相关系数可用载荷表示，载荷绝对值越大主成分与相应变量之间的关系越密切，负值表示负的作用方向[53]。芒果粉主成分载荷矩阵见表 3，结合表 2 与表 3 可知，芒果皮粉中决定 PC1 的指标包括 IDF 与 SDF 含量、D[4,3]、D[3,2]、S、WAC、OAC、180 min HI 和 180 min eGI，PC2 主要与 D[4,3]、SPAN、SCAC 和 STAC 有关；芒果肉粉 PC1 与 IDF 和 SDF 含量、WAC、CAC、SCAC、STAC、180 min HI 和 180 min eGI 有关，PC2 与 SDF 含量和粒径有关，PC3 主要与 OAC 有关；芒果核粉 PC1 与 IDF 和 SDF 含量、D[3,2]、S、WAC、OAC、CAC、180 min HI 和 180 min eGI 有关，PC2 主要与 D[4,3] 和 SPAN、SCAC 和 STAC 有关，PC3 主要与 STAC 有关。这说明果皮、果肉、果核提取的主成分均包含了大部分指标信息，且 PC1 与膳食纤维含量和消化

表 3 不同部位芒果粉主成分载荷矩阵

Table 3 Load matrix of principal components of mango powder from different parts

指标	编号	果皮		果肉			果核		
		PC1	PC2	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
IDF	X_1	−0.970	−	−0.772	0.278	−0.564	−0.952	−0.155	0.262
SDF	X_2	0.838	−0.533	0.672	−0.712	−0.194	0.802	0.571	−0.145
D[4,3]	X_3	0.774	0.620	0.259	0.927	−0.267	0.209	0.925	0.285
D[3,2]	X_4	0.943	0.299	0.344	0.915	−0.205	0.977	0.170	0.119
S	X_5	−0.962	−0.261	−0.353	−0.933	−	−0.942	−0.298	−0.150
SPAN	X_6	−0.133	0.856	−0.149	0.959	−0.235	−	0.901	0.411
WAC	X_7	0.908	−0.215	−0.701	0.56	0.333	0.749	−0.641	−
OAC	X_8	0.896	−	0.43	0.594	0.636	0.938	−0.159	0.127
CAC	X_9	0.444	0.144	0.978	−	0.153	−0.758	0.497	−0.403
SCAC	X_{10}	−0.205	0.961	−0.816	0.547	0.170	−	−0.958	−0.104
STAC	X_{11}	0.207	0.899	−0.934	0.182	0.278	0.444	−0.725	0.517
180 min HI	X_{12}	0.984	−	0.919	0.388	−	0.938	−	−0.335
180 min eGI	X_{13}	0.984	−	0.919	0.388	−	0.938	−	−0.335

特性相关性高，尤其消化特性载荷为 0.919 以上。这与图 9 中相关性分析结果类似。在果皮与果核中，PC2 主要代表了芒果粉粒径大小、粉体分散度和胆酸盐吸附能力，果肉粉中 PC2 则主要代表果肉粉粒径大小与分布。

2.9.2 主成分得分及综合得分评价 根据主成分分析结果得到芒果粉主成分得分系数矩阵如表 4。根据主成分得分矩阵及其对应的主成分载荷、特征值可得到主成分与各指标对应的得分关系式。用 F1、F2、F3 分别表示 PC1、PC2、PC3 得分，X_1~X_{13} 分别代表芒果粉 13 个指标，分别得到芒果皮粉主成分得分表达式：

$$F1=-0.35X_1+0.30X_2+0.28X_3+0.34X_4-0.34X_5-0.05X_6+0.32X_7+0.32X_8+0.16X_9-0.07X_{10}+0.07X_{11}+0.35X_{12}+0.35X_{13}$$

$$F2=-0.29X_2+0.34X_3+0.16X_4-0.14X_5+0.47X_6-0.117X_7+0.08\ X_9+0.52X_{10}+0.49X_{11}$$

芒果肉粉主成分得分表达式：

$$F1=-0.31X_1+0.27X_2+0.10X_3+0.14X_4-0.14X_5-0.06X_6-0.28X_7+0.17X_8+0.39X_9-0.33X_{10}-0.37X_{11}+0.37X_{12}+0.37X_{13}$$

$$F2=0.12X_1-0.31X_2+0.40X_3+0.40X_4-0.40X_5+0.41X_6+0.24X_7+0.26X_8+0.24X_{10}+0.08X_{11}+0.17X_{12}+0.17X_{13}$$

$$F3=-052X_1-0.18X_2-0.25X_3-0.19X_4-0.22X_6+0.31X_7+0.59X_8+0.14X_9+0.16X_{10}+0.26X_{11}$$

芒果核粉主成分得分表达式：

$$F1=-0.35X_1+0.29X_2+0.08X_3+0.36X_4-0.35X_5+0.28X_7+0.34X_8-0.28X_9+0.16X_{11}+0.34X_{12}+0.34\ X_{13}$$

$$F2=-0.07X_1+0.28X_2+0.45X_3+0.08X_4-0.14X_5+0.44X_6-0.31X_7-0.08X_8+0.24X_9-0.46X_{10}-0.35X_{11}$$

$$F3=0.25X_1-0.14X_2+0.28X_3+0.12X_4-0.15X_5+0.40X_6+0.12X_8-0.39X_9-0.1X_{10}+0.5X_{11}-0.33X_{12}-0.33X_{13}$$

根据 PC1、PC2、PC3 的方差贡献率权重，定义 F 为各指标的综合得分，建立芒果皮、肉、核粉的综

表 4 不同部位芒果粉主成分得分系数矩阵

Table 4 Principal component score coefficient matrix of mango powder from different parts

指标	编号	果皮		果肉			果核		
		PC1	PC2	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
IDF	X_1	−0.121	0.03	−0.069	0.178	−0.462	−0.223	0.088	0.146
SDF	X_2	0.100	−0.161	−0.208	−0.032	−0.11	0.178	0.052	−0.117
D[4,3]	X_3	0.104	0.179	−0.055	0.245	−0.143	−0.044	0.324	0.114
D[3,2]	X_4	0.122	0.084	−0.046	0.228	−0.092	0.079	0.098	0.126
S	X_5	−0.124	−0.073	−0.011	−0.183	−0.03	−0.068	−0.138	−0.132
SPAN	X_6	−0.008	0.253	0.012	0.223	−0.152	−0.124	0.377	0.192
AWC	X_7	0.112	−0.067	0.248	−0.035	0.204	0.041	−0.099	0.154
AOC	X_8	0.113	−0.017	0.205	−0.069	0.515	0.056	0.035	0.166
CAC	X_9	0.058	0.041	−0.077	−0.003	0.189	0.088	−0.097	−0.389
SAC	X_{10}	−0.016	0.285	0.207	0.005	0.076	−0.001	−0.242	0.032
STAC	X_{11}	0.036	0.265	0.231	−0.093	0.133	−0.18	0.103	0.476
180 min HI	X_{12}	0.123	−0.032	−0.088	0.102	0.094	0.246	−0.14	−0.19
180 min eGI	X_{13}	0.123	−0.032	−0.088	0.102	0.094	0.246	−0.14	−0.19

合评分方程分别为 $F_{果皮}$=(60.91F1+26.04F2)/86.95、$F_{果肉}$=(48.02F1+41.30F2+9.01F3)/98.327、$F_{果核}$=(57.01F1+32.87F2+8.16F3)/98.03。

根据综合评分模型可计算出不同品种芒果粉指标的综合得分及排序见表 5 和图 11。从表 5 中可知，在果皮和果核中 F1 均有 XY>GQ>JH>TN，F1 为 PC1 得分，而 PC1 与芒果粉消化性高度相关(表 3)，这与图 7、图 8 中消化特性结果一致。果皮与果核 PC2 主要代表芒果粉粒径分布和胆酸盐吸附能力，表 5 中不同品种芒果粉 F2 有 JH 最大，GQ 最小的结果。这与图 6 中胆酸盐吸附(尤其 STAC)结果一致。结合表 5 和图 11 中可知，在 TN、JH、XY、GQ 这 4 个芒果品种不同部位的 12 个样品中，JH-P、XY-P、GQ-P、JH-S、XY-S、GQ-S 和 XY-K 的综合评分 F 为正值，表明这 7 个样品的测定指标的综合品质较好，而 TN-P、TN-S、TN-K、JH-K、GQ-K 的综合评分 F 为负值则表明测定指标的综合品质较差。在果皮、果肉和果核中，XY-P、XY-S 和 XY-K 的综合排名均为第 1，TN-P、TN-S、TN-K 的综合排名均为第 4。这说明 XY 胆酸盐吸附能力和消化性综合品质较好，而 TN 较差。可根据不同芒果品种性质将其应用至不同产品中，如 TN 消化率与 eGI 值低可用于低糖产品的开发，XY、JH 等胆酸盐吸附能力强可用于开发低脂产品等。

表 5　不同部位芒果粉的主成分得分与综合排序

Table 5　Principal component score and comprehensive ranking of mango powder from different parts

部位	样品	F1	F2	F3	F	排名
果皮	TN-P	−4.375	−0.713	−	−3.278	4
	JH-P	0.266	2.661	−	0.983	2
	XY-P	2.854	0.207	−	2.061	1
	GQ-P	1.255	−2.154	−	0.234	3
果肉	TN-S	−4.025	−0.321	0.101	−2.091	4
	JH-S	1.397	−0.576	−0.515	0.393	3
	XY-S	2.021	0.058	−0.030	1.009	1
	GQ-S	0.607	0.838	0.444	0.689	2
果核	TN-K	−2.269	−0.049	−1.549	−1.464	4
	JH-K	−2.009	0.205	−2.123	−1.276	3
	XY-K	4.217	−0.073	−3.083	2.171	1
	GQ-K	0.061	−0.084	−3.146	−0.254	2

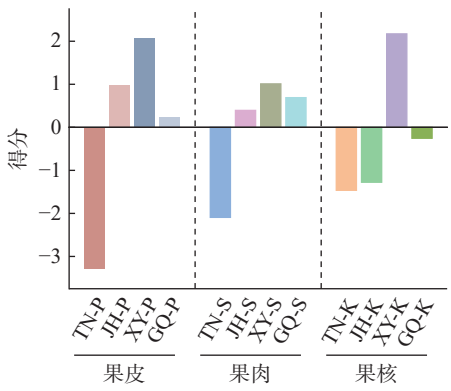


图 11　不同部位芒果粉主成分综合得分

Fig.11　Principal component comprehensive score of mango powder from different parts

3　结论

对 TN、JH、XY、GQ 芒果果皮、果肉和果核分别制粉，研究其膳食纤维含量、粒径分布、吸水吸油能力、吸附胆固醇和胆酸盐能力以及体外消化特性发现，4 种芒果粉膳食纤维含量为 42.97~83.75 g/100 g，其中 IDF 占比高于 84%，芒果核中 IDF 含量最高可达 81.26 g/100 g，SDF 在芒果皮中含量较高为 5.50~9.96 g/100 g。4 个品种中 TN 各部位的 IDF 含量最高，SDF 最低；XY 各部位中 SDF 含量最高。芒果粉具有一定的胆酸盐吸附能力，不同部位对胆酸盐吸附能力不同，但均有 STAC 高于 SCAC 的结果，STAC 吸附最高可达 20.80 mg/g。芒果粉经体外消化后，除 XY-P、XY-H 外，果皮与果核的 eGI 小于 55。相关性与主成分分析表明 IDF 与 SDF 含量、组织部位、品种等影响芒果粉体外吸附胆酸盐能力与消化特性。芒果不同部位中 IDF 含量越高，SDF 含量越低，粉碎后越易形成粒径小、比表面积大的粉体颗粒，有利于与其他物质接触而具有较好的吸附能力，但 HI 与 eGI 降低。不同品种下，XY 各部位芒果粉吸附性与体外消化特性综合评分最高，TN 各部位综合评分最低。可根据实际加工中的不同需求，利用芒果皮核资源开发适宜的健康潜力产品，实现皮核资源的高值化利用。

© The Author(s) 2026. 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] LIU Xiaogang, PENG Youliang, YANG Qiliang, et al. Determining optimal deficit irrigation and fertilization to increase mango yield, quality, and WUE in a dry hot environment based on TOPSIS[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106650.

[2] TRAN N T Y, LE T T T, NGHIA N H, et al. Developing mango powders by foam mat drying technology[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(7): 4084−4092.

[3] SALAZAR N A, ALVAREZ C, ORREGO C E. Optimization of freezing parameters for freeze-drying mango (*Mangifera indica* L.) slices[J]. Drying Technology, 2018, 36(2): 192−204.

[4] ZHANG Wentao, DONG Pan, LAO Fei, et al. Characterization of the major aroma-active compounds in Keitt mango juice: Comparison among fresh, pasteurization and high hydrostatic pressure processing juices[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 215−222.

[5] ZOTARELLI M F, da SILVA V M, DURIGON A, et al. Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying[J]. Powder Technology, 2017, 305: 447−454.

[6] 李丹彤. 芒果成熟度对干燥特性的影响及其制粉效果的研究[D]. 南昌：南昌大学, 2023. [LI Dantong. Study on the effect of mango maturity on drying characteristics and its flour milling[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]

[7] 沈乔眉, 毕先洪, 林可为, 等. 不同制粉工艺对芒果粉理化性质和结构特征的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 99−108. [SHEN Qiaomei, BI Xianhong, LIN Kewei, et al. Effects of differ-

ent grinding processes on the physicochemical properties and structural characteristics of mango powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 99−108.]
[8] MARCILLO-PARRA V, ANAGUANO M, MOLINA M, et al. Characterization and quantification of bioactive compounds and antioxidant activity in three different varieties of mango (*Mangifera indica* L.) peel from the Ecuadorian region using HPLC-UV/VIS and UPLC-PDA[J]. NFS Journal, 2021, 23: 1−7.
[9] ANDRADE L A, BARROZO M A S, VIEIRA L G M. Thermo-chemical behavior and product formation during pyrolysis of mango seed shell[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 85: 174−180.
[10] 许佳林, 彭健, 徐玉娟, 等. 不同果皮添加量芒果超微粉理化及粉体特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(3): 265−274. [XU Jialin, PENG Jian, XU Yujuan, et al. Effect of different peel addition on the physicochemical and powdery characteristics of ultra-fine mango powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(3): 265−274.]
[11] 许佳林, 温靖, 任国谱, 等. 含果皮芒果超微粉添加对冰淇淋理化、功能及感官品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 246−255. [XU Jialin, WEN Jing, REN Guopu, et al. Effect of ultra-fine mango powder contain peel on physicochemical, functional, and sensory properties of ice cream[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 246−255.]
[12] PRAWITT J, CARON S, STAELS B. Bile acid metabolism and the pathogenesis of type 2 diabetes[J]. Current Diabetes Reports, 2011, 11(3): 160−166.
[13] ALREFAI W A, GILL R K. Bile acid transporters: Structure, function, regulation and pathophysiological implications[J]. Pharmaceutical Research, 2007, 24(10): 1803−1823.
[14] ZHU Yu, CHU Jiaxi, LU Zhaoxin, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from foxtail millet (*Setaria italic*) bran[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 456−461.
[15] AJILA C M, BHAT S G, PRASADA RAO U J S. Valuable components of raw and ripe peels from two Indian mango varieties[J]. Food Chemistry, 2007, 102(4): 1006−1011.
[16] 国家市场监督管理总局, 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定: GB5009.88-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [State Administration for Market Regulation, National Health Commission of the People's Republic of China. Determination of dietary fiber in food of National Standard for Food Safety: GB 5009.88-2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.]
[17] MA Rui, CHEN Jianan, ZHOU Xuejie, et al. Effect of chemical and enzymatic modifications on the structural and physicochemical properties of dietary fiber from purple turnip (*Brassica rapa* L.)[J]. LWT, 2021, 145: 111313.
[18] LI Yinxia, NIU Li, GUO Qianqian, et al. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from prosomillet bran[J]. LWT, 2022, 154: 112609.
[19] 于美汇, 赵鑫, 尹红力, 等. 碱提醇沉黑木耳多糖体外和体内降血脂功能[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 232−237. [YU Meihui, ZHAO Xin, YIN Hongli, et al. *In vitro* and *in vivo* hypolipidemic effect of *Auricularia auricular* polysaccharides[J]. Food Science, 2017, 38(1): 232−237.]
[20] 胡方洋, 陈金玉, 张坤生, 等. 超声制备抗性淀粉及其对香肠品质和血糖生成指数的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 125−138. [HU Fangyang, CHEN Jinyu, ZHANG Kunsheng, et al. Ultrasonic preparation of resistant starch and its effect on the quality and glycemic index of sausage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 125−138.]
[21] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427−437.
[22] 胡方洋, 张得祥, 何玲玲, 等. 芒果不同组织部位膳食纤维含量及凝胶性质[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 309−318. [HU Fangyang, ZHANG Dexiang, HE Lingling, et al. Dietary fiber content and gel properties in different tissue parts of mango[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 309−318.]
[23] 郑毅, 伍斌, 邓建梅. 酶-重量法测定不同品种芒果皮中膳食纤维的含量[J]. 热带农业工程, 2013, 37(1): 4−7. [ZHENG Yi, WU Bin, DENG Jianmei. Determination of dietary fiber content in different varieties of mango peel by enzymatic-gravimetric method[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2013, 37(1): 4−7.]
[24] 邓浩, 吴广, 陈小妹, 等. 3 种芒果品种不同成熟度的营养指标聚类和主成分分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 198−205. [DENG Hao, WU Guang, CHEN Xiaomei, et al. Cluster and principal component analyses of key nutritional indicators for mangoes at different harvest maturities[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(6): 198−205.]
[25] 罗义灿, 李今朝, 邓有展, 等. 广西不同区域主栽芒果品种果实品质特性分析[J]. 热带作物学报, 2025, 46(8): 1835−1847. [LUO Yican, LI Jinzhao, DENG Youzhan, et al. Analysis of fruit quality characteristics of main cultivars of mango in different regions of Guangxi[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(8): 1835−1847.]
[26] KAPOOR R, FENG H. Characterization of physicochemical, packing and microstructural properties of beet, blueberry, carrot and cranberry powders: The effect of drying methods[J]. Powder Technology, 2022, 395: 290−300.
[27] GAUDEL N, GAIANI C, HARSHE Y M, et al. Reconstitution of fruit powders: A process-structure-function approach[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 315: 110800.
[28] TRUONG V, BHANDARI B R, HOWES T, et al. Glass transition behaviour of fructose[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2004, 39(5): 569−578.
[29] 王勋. 基于冷冻破碎和外源膳食纤维提升果浆品质与果粉分散性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. [WANG Xun. Improvement of fruit purees quality and fruit powders dispersibility based on freezing milling and exogenous dietary fiber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]
[30] ADHIKARI B, HOWES T, BHANDARI B R, et al. Stickiness in foods: A review of mechanisms and test methods[J]. International Journal of Food Properties, 2001, 4(1): 1−33.
[31] MAAS S G, SCHALDACH G, LITTRINGER E M, et al. The impact of spray drying outlet temperature on the particle morphology of mannitol[J]. Powder Technology, 2011, 213(1−3): 27−35.
[32] KAUR B, SRIVASTAV P P. Effect of Cryogenic grinding on chemical and morphological characteristics of mango (*Mangifera indica* L.) peel powder[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(4): e13583.
[33] MA Mengmei, MU Taihua. Effects of extraction methods and particle size distribution on the structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 237−246.
[34] BOVI G G, CALEB O J, KLAUS E, et al. Moisture absorp-

tion kinetics of FruitPad for packaging of fresh strawberry[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 223: 248−254.
[35] JIANG Zhanmei, ZHANG Minghan, HUANG Yuxuan, et al. Comparison and characterization of the structure and physicochemical properties of three *Citrus* fibers: Effect of ball milling treatment [J]. Foods, 2022, 11(17): 2665.
[36] PATEL R S, SCOPELLITI E M, SAVELLONI J. Therapeutic management of familial hypercholesterolemia: Current and emerging drug therapies[J]. Pharmacotherapy: the Journal of Human Pharmacology and Drug Therapy, 2015, 35(12): 1189−1203.
[37] WU Weijie, HU Jie, GAO Haiyan, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127372.
[38] SI Jingyu, YANG Chaoran, CHEN Yi, et al. Structural properties and adsorption capacities of *Mesona chinensis* Benth residues dietary fiber prepared by cellulase treatment assisted by *Aspergillus niger* or *Trichoderma reesei*[J]. Food Chemistry, 2023, 407: 135149.
[39] HUANG Hairong, CHEN Jiajun, CHEN Yi, et al. Modification of tea residue dietary fiber by high-temperature cooking assisted enzymatic method: Structural, physicochemical and functional properties[J]. LWT, 2021, 145: 111314.
[40] LI Guanghui, GAO Xueli, WANG Yonghui, et al. Effects of superfine grinding sweet potato leaf powders on physicochemical and structure properties of sweet potato starch noodles[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(10): 6498−6508.
[41] 田月月. 水溶性大豆多糖体外结合重金属和胆汁酸盐的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [TIAN Yueyue. *In vitro* binding of heavy metals and bile salts by soybean soluble polysaccharides[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]
[42] 唐玉妹. 竹笋膳食纤维-多酚复合物的构建及其性能的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022. [TANG Yumei. The study on the construction and performance of bamboo shoots dietary fibers-polyphenol complex[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2022.]
[43] STORY J A, KRITCHEVSKY D. Comparison of the binding of various bile acids and bile salts *in vitro* by several types of fiber[J]. The Journal of Nutrition, 1976, 106(9): 1292−1294.
[44] LÜTJOHANN D, HAHN C, PRANGE W, et al. Influence of rifampin on serum markers of cholesterol and bile acid synthesis in men[J]. Int Journal of Clinical Pharmacology and Therapeutics, 2004, 42(6): 307−313.
[45] ZACHERL C, EISNER P, ENGEL K H. *In vitro* model to correlate viscosity and bile acid-binding capacity of digested water-soluble and insoluble dietary fibres[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 423−428.
[46] QIAO Hanzhen, SHAO Huimin, ZHENG Xiaojing, et al. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127522.
[47] 伍菱, 欧阳欢, 倪辉, 等. 前处理对江蓠膳食纤维功能及结构特性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(3): 239−248. [WU Ling, OUYANG Huan, NI Hui, et al. Effect of pretreatment on functional and structural properties of dietary fiber from *Gracilaria*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(3): 239−248.]
[48] CORNFINE C, HASENKOPF K, EISNER P, et al. Influence of chemical and physical modification on the bile acid binding capacity of dietary fibre from lupins (*Lupinus angustifolius* L.)[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 638−644.
[49] Food products-Determination of the glycaemic index (GI) and recommendation for food classification: ISO 26642: 2010[S]. International Organization for Standardization, 2010.
[50] ZHANG Hui, LI Zhi, ZHANG Lele, et al. Effects of soluble dietary fibers on the viscosity property and digestion kinetics of corn starch digesta[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127825.
[51] WONGKAEW M, CHAIMONGKOL P, LEKSAWASDI N, et al. Mango peel pectin: Recovery, functionality and sustainable uses[J]. Polymers, 2021, 13(22): 3898.
[52] 张玉荣, 刘舒娴, 梅雪丽, 等. 基于稻谷原粮品质的米饭和米粉食用品质快速判别[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 263−271. [ZHANG Yurong, LIU Shuxian, MEI Xueli, et al. Rapid identification of eating quality of cooked rice and rice noodles based on rice grain quality[J]. Food Science, 2024, 45(7): 263−271.]
[53] 路静. 富 γ-氨基丁酸萌芽青稞米营养和蒸煮食用品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [LU Jing. Study on the nutrition and eating quality of γ-aminobutyric acid-rich germinationed highland barley rice[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]