碾磨精度对苦荞粉活性成分保留及理化特性的影响

李福利[1]，李圆圆[1]，刘丽[2]，吕庆云[1,3]，丁文平[1,3]，王月慧[4]，常宪辉[1,3*]

（1.武汉轻工大学食品科学与工程学院，湖北武汉 430023）（2.东莞益海嘉里粮油食品工业有限公司，广东东莞 523000）（3.大宗粮油精深加工教育部重点实验室，湖北武汉 430023）（4.武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院，湖北武汉 430023）

摘要：为筛选出高活性苦荞原料，研究对比甘肃、山西、云南、四川四产地苦荞粉在不同碾磨时间下的活性成分保留与理化特性。结果表明，甘肃苦荞皮层结构致密，碾磨 6 min 时碾减率<15%（其他产地 3 min 即>15%）。其活性成分保留显著优于其他产地，碾磨 6 min 后芦丁仅降 8.66%（四川苦荞碾磨 3 min 降 43.44%），槲皮素降 35.2%（山西 3 min 降 47.25%）。四产地破损淀粉含量均维持在 25.00%~28.00%，但 *eGI* 值显著上升（$P<0.05$）。甘肃苦荞升幅最缓（碾磨 3 min 仅上升 1.96%），山西同期上升最快，上升 5.36%，此外，甘肃苦荞表现出较高的膨胀势。因此，甘肃产地苦荞粉在营养活性成分保留与食用品质上更优，其碾磨 6 min 所得粉体为开发高活性苦荞食品的最佳原料，该研究为高活性苦荞食品的精准加工提供了一定的理论依据。

关键词：苦荞粉；加工精度；活性成分；理化特性；碾磨时间；*eGI* 值

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0838

Impact of Milling Fineness on Bioactive Component Retention and Physicochemical Properties of Tartary Buckwheat Flour

LI Fuli[1], LI Yuanyuan[1], LIU Li[2], LYU Qingyun[1,3], DING Wenping[1,3], WANG Yuehui[4], CHANG Xianhui[1,3*]

(1.College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

(2.Dongguan Yihai Kerry Oils, Grains & Foodstuffs Industries Co., Ltd, Dongguan 523000, China)(3.Key Laboratory of the Ministry of Education for the Fine and Deep Processing of Bulk Grain and Oil, Wuhan 430023, China)(4.College of Selenium Science and Engineering Modern Industry Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: In order to screen high-activity tartary buckwheat raw materials, this study compared the retention of active ingredients and physicochemical properties of tartary buckwheat powder from Gansu, Shanxi, Yunnan, and Sichuan provinces under different milling durations. The results showed that the cortex structure of Gansu tartary buckwheat was dense, with a milling yield of 15% after 6 minutes of milling. The retention of active ingredients was significantly better than that of buckwheat from other regions. After 6 minutes of milling, the rutin content decreased by only 8.66% (compared to a 43.44% decrease in Sichuan tartary buckwheat after 3 minutes), and quercetin decreased by 35.2% (while Shanxi buckwheat showed a 47.25% decrease after 3 minutes). The damaged starch content in samples from all four regions remained within the range of 25.00%~28.00%, but the estimated glycemic index (*eGI*) increased significantly ($P<0.05$). The *eGI* of Gansu tartary buckwheat increased the slowest (only 1.96% after 3 minutes of milling), while that of Shanxi buckwheat increased the most rapidly during the same period, by 5.36%. In addition, Gansu tartary buckwheat exhibited higher swelling capacity. Therefore, tartary buckwheat powder from Gansu retains more nutritional active components and demonstrates better edible quality. The powder obtained after 6 minutes of milling is the most suitable raw material for developing high-activity tartary buckwheat foods. This study provides a theoretical basis for the precision processing of high-activity tartary buckwheat products.

Keywords: tartary buckwheat flour; processing accuracy; active ingredients; physicochemical properties; milling time; *eGI* value

苦荞（*Fagopyrum tataricum*）作为药食同源的典型作物，其营养价值与保健功能在现代健康食品领域备受关

收稿日期：2025-06-17；修回日期：2025-09-16；接受日期：2025-09-17

基金项目：湖北省中央引导地方科技发展专项（2022BGE247）；教育部重大粮油深加工重点实验室开放课题（DZLY2021005）

作者简介：李福利（2001-），女，硕士研究生，研究方向：谷物资源综合利用及功能主食开发，E-mail：3473306692@qq.com

通讯作者：常宪辉（1982-），男，博士，副教授，研究方向：谷物资源综合利用及功能主食开发，E-mail：cxh5286@whpu.edu.cn

注[1]。我国作为苦荞的原产国和主产区，拥有丰富的种质资源。研究表明，苦荞富含多种生物活性成分[2,3]，其中黄酮类化合物（如芦丁和槲皮素）作为核心功效成分，主要分布于花、茎、叶和籽粒中[4]。该类成分可通过调节血管平滑肌收缩舒张功能改善血管弹性与通透性，在高血压及心血管疾病预防领域具有应用潜力。此外，苦荞淀粉颗粒粒径小、直链淀粉含量较禾本科作物高 26%~38%，致使其酶解速率降低而抗性淀粉比例提升[5]，有助于维持餐后血糖稳态；其蛋白质中必需氨基酸配比均衡，赖氨酸含量显著高于谷物类作物[6]，钙、钾、镁、磷等矿物质含量亦远高于小麦。

当前研究多聚焦于苦荞功能成分提取、药理机制及加工工艺，而针对不同加工精度对苦荞粉活性成分及理化性质影响的系统性研究相对匮乏。Yang 等[7]通过超临界 CO_2萃取苦荞油并验证其降脂与肠道菌群调节功能。宋盼盼等[8]研究了不同熟化方式对苦荞粉品质的影响，发现熟化方式会不同程度地降低基本营养成分、氨基酸、芦丁、槲皮素等含量。Sun 等[9]研究了不同预糊化处理方法对荞麦粉微观结构、理化性质、营养组成、功能特性以及蛋白质结构特征的影响，结果表明预胶化荞麦粉具有用于生产高质量和功能性面条的潜力。Bhinder 等[10]分析了发芽时间对苦荞面粉营养成分、抗营养素、游离和结合多酚含量以及松饼加工特性的影响，结果显示发芽 72 h 后面粉的抗氧化活性显著提升。Liu 等[11]考察了研磨方法对苦荞粉化学成分及抗氧化能力的影响，发现超细研磨较传统研磨更能保留多酚及抗氧化活性。值得注意的是，碾磨作为关键加工工序，其时长直接影响皮层去除率与粉体特性。但产地环境与碾磨工艺的协同作用机制仍待深入解析。因此，本研究选取甘肃、山西、云南、四川四产地的苦荞样品，是基于四地显著的环境梯度差异、独特的种植条件及各具特色的营养成分，其对碾磨加工研究具有良好代表性：甘肃定西（干旱半干旱气候）：富含矿物质（钾 233.93 mg/100 g，铁 4.58 mg/100 g，锌 2.37 mg/100 g）及淀粉（56.25%）[12]。山西（温带半湿润气候、强紫外线、碱性土壤）：促进酚酸与蛋白质合成，太原等地适宜种植综合品质较优的定苦 2 号（DK-2）[13]。云南（高海拔、酸性土壤）芦丁含量突出，皮层占比高致全酚及抗氧化性居首，脂肪含量达 4.73%[14]；四川为湿润气候，凉山州等地土壤肥沃，脂肪含量高（4.68%），淀粉与矿物质丰富，为全国主产区[13]。

基于此，本研究通过对上述产地苦荞进行差异化碾磨处理，旨在探究其各部位活性成分和理化性质之间的差异，从而筛选出优质原料，为开发出高活性苦荞食品的精准加工提供科学依据和数据支撑，具有一定的经济价值和社会意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

甘肃苦荞，甘肃省印象陇中农产品有限公司；山西苦荞，山西贡天下电子商务有限公司；云南苦荞，万谷食美食品科技有限公司；四川苦荞，环太生物科技股份有限公司；芦丁（色谱级），上海源叶生物科技有限公司；槲皮素（色谱级），上海源叶生物科技有限公司；香草酸（色谱级），上海阿拉丁生化科技股份有限公司；阿魏酸（色谱级），上海阿拉丁生化科技股份有限公司；山柰酚（色谱级），上海源叶生物科技有限公司；甲醇（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；磷酸（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；α-淀粉酶液（分析纯），上海源叶生物科技有限公司；盐酸（分析纯），上海源叶生物科技有限公司；氢氧化钠（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；丙酮（分析纯），国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

JXFM110 锤石旋风磨，上海嘉定粮油仪器有限公司；TM05C 碾米机，日本佐竹公司；CS-10 高速离心机，杭州彩谱科技有限公司；TGL-20bR 海尔医用冷藏箱，上海安亭科学仪器厂；JEM-2000 恒温磁力搅拌水浴锅，日本电学光子公司；UltiMate 3000 高效液相色谱，美国赛默飞世尔公司；Fluoview Fvloi 电子分析天平，日本奥林巴斯；SD matic 破损淀粉仪，法国肖邦；EnSpire 多功能酶标仪，美国铂金埃尔默。

1.3 实验方法

1.3.1 苦荞样品预处理

选择云南昭通、山西大同、四川凉山、甘肃定西 4 个产地的苦荞籽粒各 100.00 g，采用碾米机（功率：0.37 kW，

转速 1 000 r·min^{-1}）分别进行 0、3、6、9、12 min 梯度碾磨，收集皮层保存备用，将脱皮后籽粒转移至锤式旋风磨粉碎，所得粉体经 80 目标准筛过筛，筛下物密封避光保存备用。

1.3.2 苦荞籽粒不同碾磨时间下碾减率测定

取 4 个产地的苦荞籽粒每份 100.00 g 按照 3、6、9、12 min 的时间碾磨后称重。按公式（1）计算碾减率（记为 R）。

$$R=\left(1-\frac{m_1}{m_2}\right)\times 100\% \quad (1)$$

式中:

R——为碾减率，%;

m_1——为碾磨后重量，g;

m_2——为未碾磨重量，g。

1.3.3 苦荞粉各籽粒结构层次膳食纤维含量测定

根据国标 GB/T 9822-2008 的方法，并结合实验室具体条件进行了适当调整[15]，具体步骤如下：

（1）样品处理：称 1.00 g 苦荞粉，加 25 mL PBS（pH 值 6.0），混匀。加 100 μL α-淀粉酶，95~100 ℃水浴搅拌 15 min，冷却。

（2）酶解步骤：调 pH 值至 1.5（HCl），加 100 μL 蛋白酶，40 ℃水浴 60 min，冷却。调 pH 值至 6.8（NaOH），加 100 μL 胰酶，40 ℃水浴 60 min，冷却。调 pH 值至 4.5（HCl）。

（3）不可溶性膳食纤维（*IDF*）提取：离心（4 000 r·min^{-1}，10 min），水洗沉淀 2 次，留滤液测 *SDF*。滤渣依次用体积分数 78%乙醇、体积分数 95%乙醇、丙酮各洗 2 次。105 ℃烘干至恒重，得 *IDF*。

（4）可溶性膳食纤维（*SDF*）提取：滤液与体积分数 95%乙醇（1:4）混合，60 ℃预热，室温过夜。离心（4 000 r·min^{-1}，10 min），弃上清。沉淀依次用体积分数 78%乙醇、体积分数 95%乙醇、丙酮各洗 2 次。105 ℃烘干至恒重，得 *SDF*。

（5）含量计算：扣除蛋白质和灰分，结合空白校正，计算 *IDF* 和 *SDF* 含量。

1.3.4 苦荞粉蛋白质含量的测定

参照国标 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》，采用凯氏定氮法进行测定。

1.3.5 高效液相法测定苦荞粉各部位芦丁含量

参考黄兴富等[16]的方法并做适当修改，用高效液相色谱测定苦荞中芦丁含量。

首先，准确称量 10.00 mg 芦丁标准品，用甲醇溶解并定容至 10 mL，得到质量浓度 1 mg·mL^{-1} 的母液。接着，取 10.00 g 样品，以体积分数 90%甲醇索氏提取，浓缩后转移至 100 mL 容量瓶，甲醇定容后取 1 mL 稀释至 10 mL 作为待测液。分析采用 Diamonsil-C18 色谱柱（4.6×150 mm，5 μm），以乙腈-体积分数 0.2%磷酸为流动相进行梯度洗脱，流速 1 mL·min^{-1}，检测波长 365 nm，进样量 20 μL（洗脱程序表 1）。

表 1 梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution procedure

时间/min	乙腈/%	0.2%磷酸水溶液/%
0~8	20	80
8~13	40	60
13~22	40	60

1.3.6 高效液相法测定苦荞粉各部位槲皮素含量

除对照品改成槲皮素外其他步骤同 1.3.5。

1.3.7 高效液相法测定苦荞粉各部位酚酸含量

除对照品改成香草酸、阿魏酸、山奈酚外其他步骤同 1.3.5。

1.3.8 苦荞粉各部位破损淀粉含量测定

根据葛飞[17]的方法，采用 SDmatic 破损淀粉仪对苦荞粉中破损淀粉的含量进行测定。具体操作步骤如下：

（1）试剂准备：量取 120 mL 蒸馏水于反应杯。加入 3.00 g 碘化钾和 3.00 g 硼酸。滴加 1 滴浓度 0.10 mol·L^{-1}

硫代硫酸钠溶液。

（2）样品装载：将反应杯放入仪器并固定。在样品匙中均匀平铺 1.00 g 苦荞粉。

（3）测定操作：点击"TEST"，输入样品质量、蛋白及水分含量。启动测定，等待结果。

1.3.9 苦荞粉各部位溶解度和膨胀势测定

参照郑发英等[18]方法将样品（0.50 g）分别加入 50 mL 带盖离心管中，首先加入 10 mL 蒸馏水，随后将样品置于 50 ℃的水浴锅中 45 min，转速 4 000 r·min^{-1} 15 min 留上清，干燥至恒重（105 ℃），m_1 作为干燥后质量。m_2 作为沉积物质量。通过公式计算溶解度（*WS*）和膨胀势（*SP*）。

$$J=\frac{m_1}{0.50}\times 100\% \tag{2}$$

$$P=\frac{m_2}{0.50\times(100-WS)} \tag{3}$$

式中:

J——为溶解度，%;

P——为膨胀势，g/g;

m_1——为离心后上清液干燥至恒定的重量，g;

m_2——为离心管底部沉淀物的重量，g;

0.50——为常数;

100——为常数。

1.3.10 苦荞粉各部位 *eGI* 值测定

1.3.10.1 游离葡萄糖质量分数测定

方法参照赵晓燕等[19]的方法并根据具体情况稍作修改：

样品处理：称取 1.00 g（40 目）苦荞粉，加入 20 mL pH 值 5.20 磷酸盐缓冲液（浓度 0.20 mol·L^{-1}）。95 ℃磁力搅拌加热 20 min，糊化后冷却至 37 ℃。

离心分离：5 000 r·min^{-1} 离心 10 min，取上清液。

葡萄糖测定：采用 DNS 显色法测定上清液葡萄糖含量。按公式计算样品中游离葡萄糖质量分数。

$$F=m_1\times 0.90m_2\times 100\% \tag{4}$$

式中:

F——为游离葡萄糖质量分数，%;

m_1——为上清液葡萄糖含量，mg;

m_2——为淀粉样品重量，mg;

0.90——为常数。

1.3.10.2 总淀粉质量分数（*TS*）的测定

按照 Sandhu 等[20]方法测定。

1.3.10.3 体外模拟淀粉消化过程及水解曲线

体外模拟消化实验步骤（基于赵晓燕法修改）:

消化液配制：按表 2 配制三种消化液：SSF（模拟唾液）、SGF（模拟胃液）、SIF（模拟肠液）

口腔消化阶段：混合：5.00 g 样品+4 mL SSF+0.75 mL *α*-淀粉酶（质量浓度 1 000 U·mL^{-1}）+225 μL H_2O+25 μL 浓度 0.3 mol Ł$^{-1}$ $CaCl_2$。模拟咀嚼：研杵破碎 1 min。温育：37 ℃避光搅拌 2 min。

胃消化阶段：加液：口腔消化液+7.50 mL SGF+1.60 mL 胃蛋白酶液（质量浓度 3 200~4 500 U·mL^{-1}）+5 μL 浓度 0.3 mol Ł$^{-1}$ $CaCl_2$+200 μL 浓度 1 mol Ł$^{-1}$ HCl+695 μL H_2O。调 pH 值：用浓度 1 mol Ł$^{-1}$ HCl 调至 3.0。反应：37 ℃避光振荡 2 h，维持 pH 值≈3.0。

肠道消化阶段：加液：胃消化液+11 mL SIF+5 mL 胰液素（质量浓度 800 U·mL^{-1}）+2.50 mL 质量分数 4%胆盐。调 pH 值：用浓度 1 mol Ł$^{-1}$ NaOH 调至 7.0。反应：37 ℃避光振荡，于 0、20、30、60、90、120、150、180 min

取样。终止反应：

沸水浴 5 min→冷却→5 000 r·min^{-1} 离心 10 min（4 ℃）

测定与计算：DNS 法：测上清液葡萄糖含量，公式：计算样品水解率（所有步骤需避光操作，pH 值和温度严格把控）。

以淀粉水解率（Hydrolysis rate of starch，HRS）为纵坐标，水解时间为横坐标绘制苦荞粉的水解曲线。水解率的计算公式如下：

$$S = m_1 \times 0.90\ m \times 100\% \tag{5}$$

式中：

S——为淀粉水解率，%（质量分数）;

m——为总淀粉含量，mg;

m_1——为取样点的消化葡萄糖当量，mg。

0.90——为常数。

淀粉水解曲线下面积（AUC）的计算

$$AUC = C_\infty (t_f - t_0) - \left(\frac{C_\infty}{K}\right)\left[1 - e^{K(t_f - t_0)}\right] \tag{6}$$

式中：

C_∞——为水解 180 min 后淀粉水解率的平衡值（%）;

t_f——为最终时间，180 min;

t_0——为起始时间，0 min;

k——为一级反应动力学常数。

（4）苦荞主食面包淀粉水解指数（Hydrolysis index，HI）及 eGI 值的计算：

$$HI = AUCS/AUCC \tag{7}$$

$$eGI = 39.71 + 0.55 \times HI \tag{8}$$

式中：

AUCS——为被测样品的淀粉水解曲线下面积;

AUCC——为参考样品（白面包）的淀粉水解曲线下面积。

表 2 消化液的配置

Table 2 Disposition of digestive fluid

试剂名	质量浓度/(g·L^{-1})	SSF/mL	SGF/mL	SIF/mL
KCl	37.70	3.02	1.38	1.36
KH_2PO_4	68.00	0.74	0.18	0.16
$NaHCO_3$	84.00	1.36	2.50	8.50
NaCl	117.00	-	2.36	1.92
$MgCl_2(H_2O)_6$	30.50	0.10	0.08	0.22
$(NH4)_2CO_3$	48.00	0.12	0.10	-
$CaCl_2$	44.10	消化时再加入样品中，防止沉淀		
HCl	6.00		-	
NaOH	1.00		-	

1.4 数据处理

所有实验均设置三个平行，并通过 IBM SPSS Statistics 19（SPSS 股份有限公司，Chicago，USA）将结果作为平均值±标准差的形式呈现并用于后续分析。通过单因素方差分析（ANOVA）和邓肯多重比较检验来评估各组

之间的统计学显著差异（$P<0.05$）。在结果中标注小写字母（a、b、c、d、e），相同的字母表示组间无显著差异（$P<0.05$）。图形通过使用 Origin 9.0（Origin Lab Corp，Northampton，MA，USA）进行绘制。

2 结果与讨论

2.1 苦荞籽粒碾磨时间和碾减率相关性分析

图 1 中可以看出，4 个产地的碾磨时间跟碾减率都呈显著正相关关系（甘肃：$y=2.35x+2$，$R^2=0.88$，*Pearson*=0.96；山西：$y=1.01x+16.8$，$R^2=0.93$，*Pearson*=0.97；云南：$y=1.08x+13$，$R^2=0.89$，*Pearson*=0.96；四川：$y=0.89x+17.3$，$R^2=0.84$，*Pearson*=0.95），为后续研究不同部位中活性成分及理化性质的分析提供理论依据。值得注意的是，甘肃产地苦荞籽粒的碾减率拟合方程斜率为 2.35，显著高于其他产地（山西 1.01、云南 1.08、四川 0.89），表明随着碾磨时间延长，甘肃产地苦荞籽粒碾减率的增长速率更快。同时，甘肃产地苦荞籽粒在碾磨前 6 min 内的碾减率均低于 15%，而其他产地在碾磨 3 min 时碾减率就已超过 15%，这一差异直观表明甘肃苦荞籽粒具有更为致密坚硬的皮层结构，在碾磨过程中更难被去除。这种结构特性可能与甘肃当地的气候、土壤等生长环境有关，坚硬的皮层在碾磨初期能对内部籽粒结构和成分起到更好的保护作用，为后续研究不同碾磨程度下活性成分保留情况奠定了结构基础。

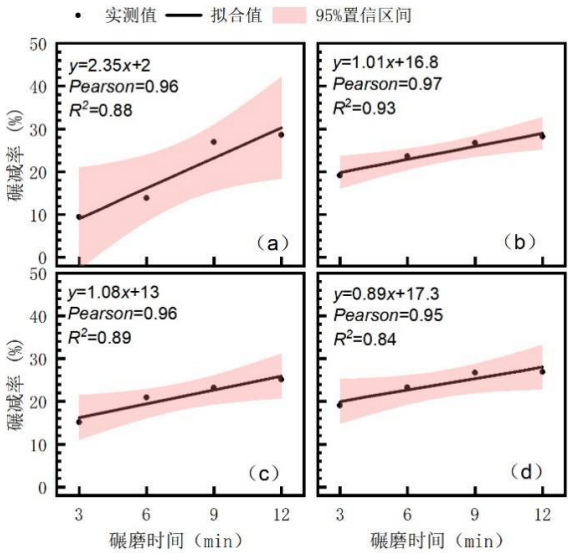

图 1 碾磨时间与碾减率的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of Grinding Time and reduction rate

注：a：甘肃；b：山西；c：云南；d：四川。

2.2 苦荞粉活性成分的分布与保留特性

2.2.1 苦荞粉各籽粒结构层次膳食纤维含量分析

对 4 个产地的苦荞进行碾磨后，测定了其各籽粒结构层次的膳食纤维含量，结果如图 2 所示：整体上，各产地未经碾磨（碾磨 0 min）直接磨粉时，苦荞粉中膳食纤维含量最高，随着碾磨时间的增加，膳食纤维含量呈下降趋势，但不同产地表现存在差异。甘肃产地的膳食纤维在碾磨 0~3 min 内基本保持稳定，从 2.23 g/100 g 到 2.2 g/100 g 仅降低了 1.35%；3~6 min 时降低了 0.45%；而在 6~9 min 期间出现显著下降，从 2.19 g/100 g 降至 1.65 g/100 g，降幅达 24.66%。相比之下，山西、云南和四川产地在碾磨 3 min 时膳食纤维即发生大幅下降，分别从 2.80 g/100 g 降至 1.42 g/100 g（降幅 50.00%）、2.75 g/100 g 降至 1.81 g/100 g（降幅 34.18%）和 2.35 g/100 g 降至 1.49 g/100 g（降幅 36.68%）。后续碾磨过程中，各产地膳食纤维变化率普遍低于 5%，这表明苦荞中的膳食纤维主要富集于谷皮和糊粉层中。苦荞籽粒不同结构层次不仅膳食纤维含量不同，其组成也存在显著差异。果皮中总膳食纤维（*TDF*）含量极高（35%~42%），其中不溶性膳食纤维（*IDF*）占比超过 85%，主要由纤维素和木聚糖组成，预示其具有强大的持水力和促进肠道蠕动的功能；而糊粉层中可溶性膳食纤维（SDF）比例相对较高，

SDF/IDF 比值可达 0.32，明显高于其他层次[21,22]，暗示其更利于参与调节血糖和血脂代谢。结合碾减率结果可知，甘肃苦荞皮层较硬，需碾磨至 6 min 后才被有效去除，而其他产地的皮层在碾磨 3 min 后即基本被去除。这可能与甘肃产地的苦荞品种以及特定的地理环境条件有关。该产区苦荞主要分布在河西走廊和陇东高原，海拔 1 500~2 200 m，属温带大陆性气候，昼夜温差大（15~20 ℃），年降水量少。这种环境下，苦荞可能形成了适应性机制：富含 *IDF* 的细胞壁结构有助于减少水分流失，较高的木质素积累则增强了对极端温度的抗性[23,24]。Tian 等[25]研究了向苦荞中添加皮层（0%、6%、12%、18%、24%、30%）对面粉特性、挤压面条的烹饪和营养特性的影响后发现，虽然添加皮层可能会降低面条的烹饪质量，但膳食纤维含量显著增加，这一发现为今后开发苦荞面条以提高营养成分的研究提供了重要基础。

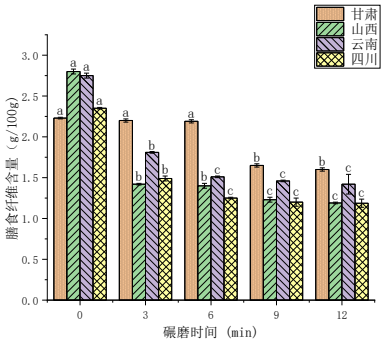

图 2 苦荞粉各部位膳食纤维含量图

Fig.2 Contents of dietary fiber in different parts of Tartary buckwheat powder

注：图中不同字母表示具有显著差异（$P<0.05$）。下图同。

2.2.2 苦荞粉各部位芦丁含量分析

4 个产地的苦荞经碾磨后对其各部位芦丁含量进行测定，结果如图 3 所示：云南与四川苦荞的初始芦丁含量较高，分别为 12 861.61 ng·mg^{-1} 和 15 839.99 ng·mg^{-1}，显著高于甘肃产地的 8 988.22 ng·mg^{-1}（$P<0.05$）。云南产区海拔高、紫外线强，可能促进了黄酮类物质的合成。朱智慧等[26]研究指出，苦荞在紫外光胁迫下会积累黄酮类化合物以抵御辐射损伤，表明紫外线是芦丁等成分累积的重要环境因子。Guo 等[27]进一步证实，与环境因素的交互作用相比，生长条件对苦荞酚类物质含量及抗氧化特性的影响更为显著，高海拔等生态参数对芦丁和酚酸合成具有重要作用。尽管甘肃苦荞初始芦丁含量相对较低，但其致密的皮层结构在加工过程中表现出显著优势。碾磨 6 min 时，甘肃苦荞的芦丁保留率高达 91.34%（降幅仅为 8.66%），明显优于四川（56.56%）和云南（75.92%）。随着碾磨时间延长，山西、云南、四川产地苦荞芦丁含量均有不同程度减少，且碾磨 3 min 时下降较为显著，四川减少幅度最大，从 15 839.99 ng·mg^{-1} 到 8 959.00 ng·mg^{-1}，减少了 43.44%；其次是山西，从 92 239.99 ng·mg^{-1} 到 54 719.61 ng·mg^{-1}，降低 40.67%；云南从 12 861.61 ng·mg^{-1} 降至 9 758.92 ng·mg^{-1}，减少 24.08%；相比之下，甘肃苦荞芦丁含量呈缓慢而均匀的下降趋势，0~3 min 内仅减少 1.28%，后续各阶段减少率也基本低于 10.00%。表明甘肃产地苦荞粉芦丁分布更为均匀，其核心优势在于活性成分的加工耐受性，而非绝对合成量，坚硬的皮层结构（碾减率前 6 min<15%）有效缓解了碾磨过程中的成分损失。

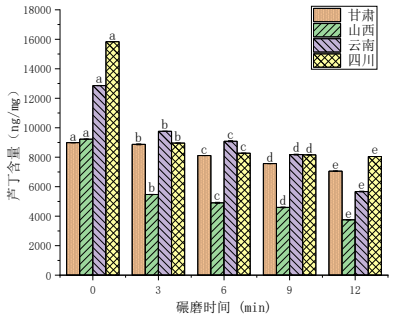

图 3 苦荞粉各部位芦丁含量

Fig.3 Contents of rutin in different parts of Tartary buckwheat powder

2.2.3 苦荞粉各部位槲皮素含量分析

图 4 显示了 4 个产地苦荞经碾磨后各部位槲皮素含量的变化：可以看出甘肃产地的苦荞中槲皮素含量显著高于其他产区（$P<0.05$），云南产地次之。4 个产地苦荞粉槲皮素含量都在随着碾磨时间的延长而出现不同程度的减少，山西产地的苦荞槲皮素含量在碾磨 3 min 的时候减少最多，从 53.42 ng·mg^{-1} 到 28.38 ng·mg^{-1}，减少了 47.25%；其次是四川，从 70.67 ng·mg^{-1} 到 40.14 ng·mg^{-1}，减少了 43.87%；云南呈现渐进式损失，在碾磨 3、6、9、12 min，降幅分别为 18.76%、14.57%、39.92%、9.36%。云南产地的苦荞中槲皮素可能大量含在胚乳层当中，而其他产地的槲皮素含量大多在谷皮当中。这可能是由于与云南地区的海拔和纬度有关。据徐浪等[28]的研究表明，槲皮素含量与海拔和纬度存在相关性，理论上，云南地区的海拔高利于槲皮素积累，但其合成与积累还受土壤成分、降水、光照时长与强度等其他因素影响。不同产地、类型的荞麦功能性成分含量具有较大的差异性，这除了来源于品种选育目标要求的差异外，也受到产地的种植条件及后期管理、天气等因素变化的影响[29]。甘肃地区可能在这些因素上更有利于苦荞合成和积累槲皮素，进而使甘肃产地苦荞的槲皮素含量在本研究的测定条件下显著高于云南产地。

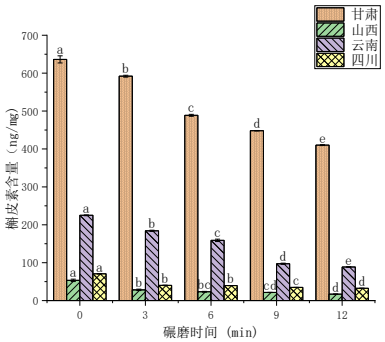

图 4 苦荞粉各部位槲皮素含量

Fig.4 Contents of quercetin in different parts of Tartary buckwheat powder

2.2.4 苦荞粉各部位香草酸含量分析

对 4 个产地的苦荞经碾磨后各部位香草酸含量进行测定，结果如图 5 所示。研究发现，各产地苦荞粉的香草酸含量随碾磨时间延长均呈下降趋势，但减少幅度存在显著地域性差异（$P<0.05$），这与 Grażyna 等[30]研究表明苦荞品种之间香草酸含量存在差异相符。云南产地苦荞在未经碾磨时香草酸含量最高，达 6.75 ng·mg^{-1}，但在碾磨 3 min 后骤降至 3.03 ng·mg^{-1}，降幅为 55.67%，至 6 min 时进一步减少 43.45%。表明其香草酸主要富集于谷皮与糊粉层，表层结构剥离导致快速流失。四川产地苦荞的香草酸含量在碾磨 6 min 时锐减 52.09%降至 2.86 ng·mg^{-1}，这说明四川产地的苦荞香草酸含量绝大多数都在糊粉层当中；中期碾磨造成该层破坏引发剧变。山西产地的苦荞在碾磨 3 min 和 12 min 时的香草酸含量损失率相近，均为 29.87%，提示其香草酸在谷皮及胚乳中分布相对均衡。甘肃产地苦荞在碾磨不同时间下，香草酸含量呈现出一定变化，仅在碾磨 6 min 时相对减少较多，减少了 22.43%，其他时段变化平缓，可能因其籽粒结构紧密，需更长时间碾磨才能释放，符合干旱产区植物的结构进化特征。

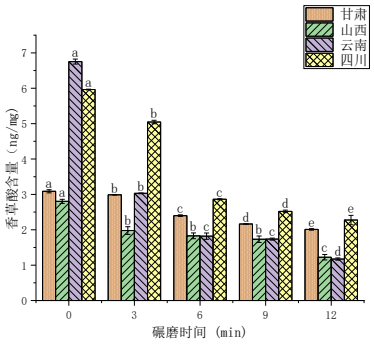

图 5 苦荞粉各部位香草酸含量

Fig.5 Contents of vanillic acid in different parts of Tartary buckwheat powder

2.2.5 苦荞粉各部位阿魏酸含量分析

4 个产地的苦荞经碾磨后对其各部位阿魏酸含量进行测定，结果如图 6 所示：可以看出，云南和四川产地的苦荞阿魏酸含量显著高于甘肃和山西。四川产地的苦荞阿魏酸含量随碾磨时间延长变化较小，各阶段减少率均较低，减少率都在 5.43%左右，9 min 时仅减少 0.66%，说明四川产地的苦荞阿魏酸含量基本存在于胚乳中。云南产地的苦荞阿魏酸含量则随碾磨时间延长呈近似匀速下降趋势，碾磨 3 min 时下降 11.76%，6 min 时下降 13.23%，9 min 时下降 14.21%，12 min 后下降 19.33%，说明云南产地的苦荞阿魏酸含量大部分存在于胚乳当中。山西产地的苦荞在碾磨 3 min 时阿魏酸含量减少了 19.56%，此后，随碾磨时间延长，其减少速率放缓，例如在碾磨至 12 min 时的减少率为 9.32%，这表明阿魏酸在籽粒各结构层中分布相对均匀。甘肃产地的苦荞在碾磨 3 min 时从 0.73 ng·mg^{-1} 到 0.63 ng·mg^{-1} 减少了 13.33%，6 min 时从 0.63 ng·mg^{-1} 到 0.47 ng·mg^{-1} 减少了 26.54%，9 min 时从 0.47 ng·mg^{-1} 到 0.30 ng·mg^{-1} 减少 36.34%，12 min 时从 0.30 ng·mg^{-1} 到 0.24 ng·mg^{-1} 减少了 20.43%，这表明甘肃产地的阿魏酸在籽粒中分布也较均匀，但胚乳中的含量相对较低，其主要富集于皮层和糊粉层中。这种分布特征可能与产地的特定环境因素（如海拔）有关[31]。甘肃、云南、四川、山西四省地处中国不同地理区域，气候条件、土壤类型、海拔高度等存在显著差异，这些因素共同作用于苦荞的生长发育和次生代谢产物积累。光照是影响植物酚类物质合成的关键环境因子之一。研究表明，光照强度与苦荞黄酮类物质含量呈正相关，而阿魏酸作为黄酮合成的前体物质，其含量也可能受到光照的调控。云南和四川部分高海拔地区（如凉山州）具有较强的紫外线辐射和较长的日照时间，这可能促进苦荞中 *PAL* 等酶的活性，从而增加阿魏酸的合成[32,33]。温度也是一个重要因素。昼夜温差较大的地区（如甘肃部分地区）有利于植物光合产物的积累和次生代谢的进行。适度的低温胁迫可能诱导植物产生应激反应，增加酚类抗氧化物质的合成[34,35]。土壤中的矿质元素含量和 pH 值也会影响苦荞的生长和阿魏酸积累。

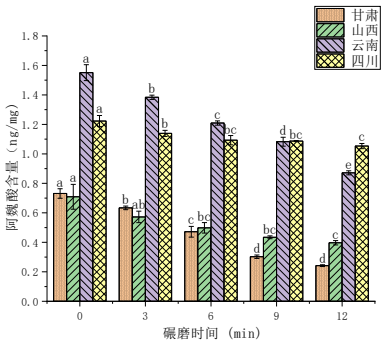

图 6 苦荞粉各部位阿魏酸含量

Fig.6 Contents of ferulic acid in different parts of Tartary buckwheat powder

2.2.6 苦荞粉各部位山奈酚含量分析

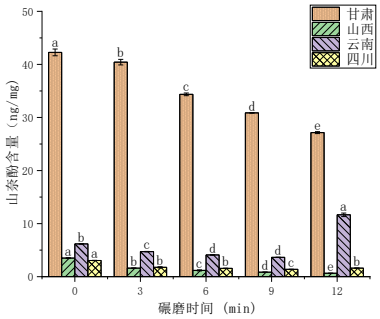

图 7 苦荞粉各部位山奈酚含量

Fig.7 Contents of kaempferol in different parts of Tartary buckwheat powder

4 个产地的苦荞经碾磨后对其各部位山奈酚含量进行测定，结果如图 7 所示：可以看出，甘肃产地苦荞中的山奈酚含量显著高于其他三个产地，其中山西产地的苦荞山奈酚含量在碾磨 3 min 后变化最大，由 3.50 ng·mg^{-1} 降至 1.62 ng·mg^{-1}，降幅达 54.34%。此后，随碾磨时间延长，其含量持续下降，各阶段减少率均较高（约 30.21%）。这说明山西产地苦荞的山奈酚大多分布在谷皮及糊粉层当中；四川产地的苦荞在碾磨 3 min 时山奈酚含量从

3.06 ng·mg^{-1} 到 1.76 ng·mg^{-1}，减少了 42.45%，这说明四川产地的苦荞山奈酚含量更多的是存在于谷皮当中；甘肃产地的苦荞在碾磨 3 min 时从 42.27 ng·mg^{-1} 到 40.42 ng·mg^{-1} 仅降低了 4.95%，而碾磨 6 min 后到了 34.36 ng·mg^{-1}，降低了 15.32%，随着碾磨时间的延长，甘肃苦荞中的山奈酚含量在逐渐降低但速率放缓，说明甘肃苦荞的山奈酚含量分布比较均匀，但谷皮中稍多；云南苦荞在碾磨至 12 min 时，山奈酚含量呈现升高趋势，这可能与苦荞的结构对山奈酚释放的影响相关。山奈酚大概率集中分布在苦荞的谷皮、糊粉层等特定结构部位，而云南产地苦荞籽粒的胚乳部位山奈酚含量相对更高，这或许和当地的气候及环境因素密切相关。在碾磨前期，苦荞的这些结构未被充分破坏，山奈酚释放量较少；当碾磨时间达到 12 min 时，苦荞组织被更彻底地破碎，原本被包裹或结合在组织内的山奈酚得以大量释放，进而使得检测到的酚含量显著上升。

2.3 苦荞粉粉体功能特性与消化行为

2.3.1 苦荞粉各部位蛋白质含量分析

对甘肃、山西、云南、四川四产地苦荞粉，在 0、3、6、9、12 min 不同碾磨时长下的蛋白质含量测定分析，结果如图 8 所示，山西产地苦荞粉的蛋白质含量最高（2.18%），云南（1.80%）与四川（2.06%）产地的蛋白质含量显著高于甘肃产地（1.83%），但二者之间无显著差异。从碾磨时间的变化趋势来看，随着碾磨时间的延长，各产地苦荞粉的蛋白质含量总体呈下降趋势。这表明蛋白质主要富集于苦荞籽粒的皮层和糊粉层中，随着碾磨的进行，这些富含蛋白的结构被逐渐去除，导致最终粉体的蛋白质含量降低。例如，山西苦荞在碾磨 3 min 时，蛋白质含量从 2.18%显著下降至 1.16%，降幅达 46.8%，证实了其蛋白质在表层的集中分布。相比之下，甘肃苦荞的蛋白质含量在碾磨过程中的下降幅度较为平缓，各时间点间的变化不显著，提示其蛋白质在籽粒中的分布可能更为均匀，或其致密的皮层对内部胚乳（蛋白质主要分布区之一）起到了更好的保护作用。本研究结果表明，甘肃苦荞粉的蛋白质含量显著低于其他产区。这一特性与其较高的膨胀势存在关联。

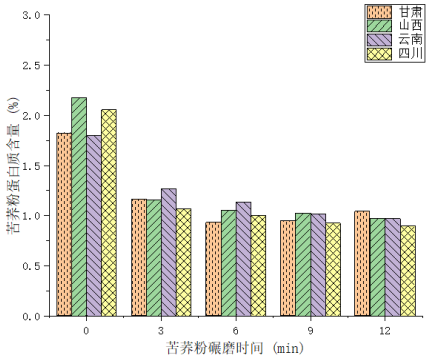

图 8 苦荞粉各部位蛋白质含量

Fig.8 Protein Content in Different Parts of Tartary Buckwheat Flour

2.3.2 苦荞粉各部位破损淀粉含量分析

根据 Wang 等[36]的研究，破损淀粉含量在一定范围内，面团内部的网络结构紧密和稳定。然而当破损淀粉含量过高时，面团在形成过程中会变得结构松散从而导致面制品适口性变差。

总体来看，图 9 中 4 个产地苦荞破损淀粉含量都在 25.00%~28.00%之间，且碾磨时间对破损淀粉含量无显著影响。甘肃产地苦荞在碾磨 3 min 时变化不显著，仅增多 0.24%，说明在初始碾磨阶段，苦荞颗粒的结构相对完整，机械作用对淀粉颗粒的破坏较小，破损淀粉的增加不明显。但从碾磨 6 min 后甘肃苦荞的破损淀粉含量从 27.49%显著下降至 25.59%，下降了 2.10%，这可能是因为随着碾磨时间的增加，苦荞颗粒逐渐被破碎，淀粉颗粒从细胞结构中释放出来，部分破损淀粉在机械作用下进一步细化或与其他成分（如蛋白质、纤维）结合，导致检测到的破损淀粉含量减少。但在碾磨 9 min 时又增加了 1.35%，随后又下降了 2.15%，这说明破损淀粉的变化并非随着碾磨时间的增加而单调递增，而是受到多种因素（如机械作用强度、淀粉颗粒结构、成分相互作用等）的影响，呈现出波动性。Guan 等[37]研究发现随着转速和研磨时间的增加，颗粒尺寸明显减小，破损淀粉含量随着面粉/淀粉尺寸的减小而明显增加，面粉粒径与破损淀粉含量、糊化温度呈显着负相关，与下降数值呈显着正相关。其他产地：山西、云南、四川的破损淀粉含量随碾磨时间波动幅度均<1.5%，且组间无显著差异。在碾磨过程中，淀粉颗粒可能经历了从完整到破损、再到部分降解或结合的过程，导致破损淀粉含量的波动。

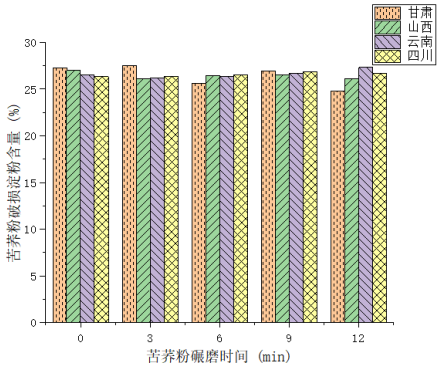

图 9 苦荞粉各部位的破损淀粉含量

Fig.9 Damaged starch content in various parts of Tartary buckwheat powder

2.3.3 苦荞粉各部位溶解度和膨胀势分析

4 个产地的苦荞经碾磨后对其各部位溶解度进行测定，由图 10 可知，未经碾磨时，云南和四川产地的苦荞溶解度相对较高，显著高于甘肃和山西产地。这一初始差异可能与不同产地苦荞淀粉的固有物理特性有关，如淀粉颗粒结构致密程度或表面可及性差异，导致云南、四川产地的淀粉更易于溶剂接触。随着碾磨时间延长，云南与四川产地苦荞的溶解度呈下降趋势,云南从 6.72%降至 5.23%，四川从 6.58%降至 5.76%，降幅分别为 1.49%和 0.82%。这一变化可能源于碾磨过程中机械力作用导致的淀粉颗粒团聚效应。颗粒间碰撞结合导致有效比表面积减小，限制了淀粉与溶剂的接触，从而降低溶解度。云南产地溶解度下降更为明显，提示其淀粉颗粒或许更易在碾磨作用下发生团聚。相比之下，甘肃与山西产地苦荞的溶解度在碾磨初期（0~3 min）变化较小，相对稳定。然而，在碾磨后期（6 min 后），甘肃产地溶解度开始显著下降，从 5.77%降低到了 4.86%，降幅 0.91%，可能与随时间累积的淀粉团聚效应逐渐占据主导有关。相反，山西产地的苦荞在碾磨 9~12 min 的时候溶解度从 5.29%升高到 6.66%，升高了 1.37%。该现象可能源于长时间碾磨产生的热量和机械力，使得原本紧密的淀粉颗粒结构受到破坏，部分淀粉分子得以释放，增加了与溶剂的接触机会，从而导致溶解度上升。此外，也可能是该产地苦荞淀粉具有特殊的结构特性，在特定的碾磨时间下更易发生结构松散的现象。除了淀粉颗粒团聚效应外，本研究结果表明，研磨精度对苦荞粉中膳食纤维含量也具有显著影响，而膳食纤维的理化性质对溶解度和膨胀势有重要调控作用。膳食纤维所形成的致密植物细胞壁骨架在粉体体系中构成物理屏障，抑制水分的渗透与迁移，从而阻碍淀粉颗粒的充分水化和膨胀，导致溶解度与膨胀势降低[38]。Zhang 等[39]的研究表明，水溶性膳食纤维如魔芋葡甘露聚糖可通过竞争体系中的可用水分，限制淀粉的水分吸收与传热过程，进而影响其糊化特性、回生行为、膨胀能力及消化率。因此，不同产地苦荞原料外层结构中膳食纤维的含量及组成差异，可能是导致同一研磨条件下溶解度与膨胀势表现不一的重要潜在因素。该机制可能与淀粉颗粒团聚效应共同存在叠加或协同作用，综合调控碾磨过程中苦荞粉的理化性质变化。

4 个产地的苦荞经碾磨后对其各部位膨胀势含量进行测定，结果如图 11 所示：淀粉糊化特性中的膨胀势与溶解度是评价其功能性质的重要指标。膨胀势表征淀粉体系在热处理过程中维持水合作用的能力，而溶解度则指示淀粉分子在溶胀过程中的分散程度。研究表明，淀粉颗粒的这两种特性主要取决于其分子结构特征：首先，支链淀粉的链长分布（DP<14 的短链与 DP>18 的长链比例）直接影响结晶区与非结晶区的相互作用强度；其次，直链淀粉含量与非淀粉组分（如蛋白质、脂质等）的存在形式也起着关键调控作用。Gomands 等[40]通过结构分析发现，淀粉膨胀性能与支链淀粉中短链片段（DP<14）呈正相关（r=0.82，P<0.01），而与长链片段（DP>18）呈显著负相关（r=-0.76，P<0.05）。Wu 等[41]进一步揭示，非淀粉组分中，疏水性蛋白质会阻碍水分子渗透（接触角增加 15°~22°），而脂类物质通过与直链淀粉形成 V 型复合物（络合率达 63%~78%），共同抑制淀粉颗粒的膨胀行为[42]。

本研究结果表明，甘肃产区苦荞粉的蛋白质含量显著低于其他产区（P<0.05），这一特性可能与其较高的膨胀势存在关联。在溶解度方面，各产区差异相对较小，但甘肃样品表现出轻微优势，这可能源于其淀粉颗粒内部结构排列较为疏松，有利于水分子的渗透和扩散。进一步分析显示，甘肃和山西产区苦荞粉的膨胀特性可能受多重因素影响：1）生态因子：包括海拔（甘肃平均 1 500~2 000 m）、年均温（8~10 ℃）等气候参数；2）品种特性：当地主栽品种的淀粉分支度（DB=4.2~4.5）显著低于对照品种；3）栽培措施：特有的轮作制度（苦荞-马铃薯-燕

麦）可能改变淀粉组成。根据刘紫薇[43]研究，苦荞淀粉的膨胀模式与绿豆淀粉类似，表现为典型的限制型膨胀特征，其膨胀势在 85~95 ℃温区仅增长 12%~15%，且对机械处理（如碾磨）的敏感性较低（变异系数<8%）。这种特性使其在食品加工中能保持较好的结构稳定性。

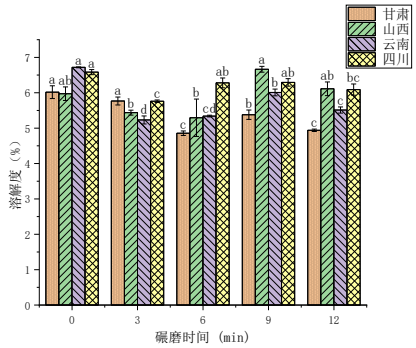

图 10 苦荞粉各部位溶解度

Fig.10 Solubility of various parts of Tartary buckwheat powder

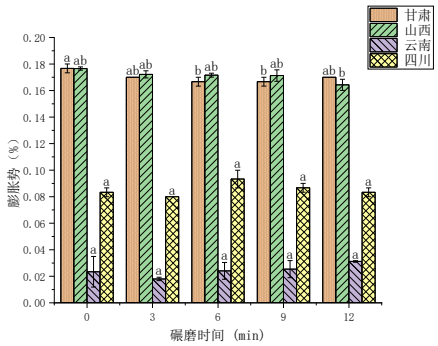

图 11 苦荞粉各部位膨胀势

Fig.11 Expansion potential of Tartary buckwheat powder

2.3.4 苦荞粉各部位 *eGI* 值分析

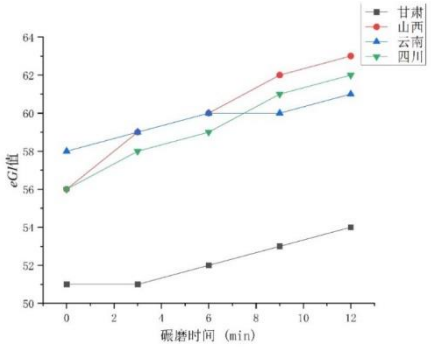

图 12 苦荞粉各部位的 *eGI* 值

Fig.12 *eGI* value of each part of Tartary buckwheat powder

4 个产地的苦荞经碾磨后，其各部位 *eGI* 值测定结果如图 12 所示：四个产地苦荞的 *eGI* 值均随碾磨时间延长而升高，这主要归因于碾磨过程破坏了籽粒物理结构、减小了粒径，显著增加了淀粉颗粒的表面积和酶可及性，从而提高了消化速率，这与 John 等[44]的研究相符。值得注意的是产地间的差异：甘肃产地 *eGI* 值始终低于其他产地，且在碾磨初期（3 min 内）保持稳定（这与该产地苦荞皮层较致密的观点相契合），3 min 后才缓慢上升，增幅为 1.96%。而山西产地的苦荞在碾磨 3 min 时 *eGI* 值急剧上升，从 56.00 上升至 59.00，上升 5.36%。对于这些差异，需综合考虑苦荞内在成分及其相互作用：一方面，甘肃苦荞在碾磨 6 min 内膳食纤维含量降幅较小（<2%），而山西苦荞在碾磨 3 min 时膳食纤维含量从从 2.8 g/100 g 到 1.42 g/100 g，即骤降 50%。膳食纤维可通过增加食糜粘度、包裹淀粉颗粒等方式延缓消化。另一方面，多酚类物质（如芦丁、槲皮素）能与淀粉形成 V 型复合物，改

变其构象，降低酶敏感性。甘肃苦荞在碾磨 6 min 时芦丁保留率高达 91.34%（仅降 8.66%），槲皮素保留率 64.80%（降 35.20%），显著优于山西在碾磨 3 min 时（芦丁降 40.67%，槲皮素降 47.25%）。Zhu 等[45]研究发现，槲皮素对苦荞淀粉的消化有较强的抑制作用，其原因在于：槲皮素能显着改变酶分子的结构，从而抑制酶的活性。Li 等[46]发现，槲皮素与苦荞淀粉形成非包合复合物后，通过氢键作用增加了淀粉结构的致密性和有序性（通过 XRD 和 SEM 观察），导致淀粉的水解速率和水解程度显著降低，抗性淀粉含量增加。当槲皮素添加量为 10%时，抗性淀粉含量达到最高。

3 结论

本研究系统分析了甘肃、山西、云南、四川四产地苦荞粉在不同碾磨时间下活性成分与理化特性的变化规律，旨在筛选高营养保留率的苦荞原料。研究表明：苦荞皮层是芦丁、槲皮素等活性成分的主要富集区域。不同产地苦荞粉的活性成分、理化特性及 *eGI* 值受碾磨时间显著影响。甘肃苦荞皮层富含活性成分，芦丁和槲皮素含量随碾磨时间下降（芦丁从 8 988.22 $ng \cdot mg^{-1}$ 降至 7 055.51 $ng \cdot mg^{-1}$，槲皮素从 633.05 $ng \cdot mg^{-1}$ 降至 410.46 $ng \cdot mg^{-1}$）。云南苦荞香草酸集中于谷皮和糊粉层，四川苦荞阿魏酸主要存在于胚乳。碾磨前云南、四川苦荞溶解度较高，甘肃、山西较低，随碾磨时间延长前者下降明显，后者相对稳定。甘肃苦荞因蛋白质含量低膨胀势较高，破损淀粉含量 25.00%~28.00%，碾磨后期波动明显。*eGI* 值方面，甘肃苦荞因直链淀粉和抗性淀粉含量高，总体低于其他产地，碾磨 3 min 后基本无变化，而山西苦荞在此时上升最快。综合营养保留（芦丁、槲皮素损失率<10%）与食用品质（低 *eGI* 值、高膨胀势），确定甘肃苦荞碾磨 6 min 的粉体为最佳原料。

参考文献

[1] ZOU L, WU D, REN G, et al. Bioactive compounds, health benefits, and industrial applications of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(5): 657-673.

[2] ZLATA L, MATEJA G, MATEVZ L, et al. Breeding buckwheat for increased levels of rutin, ruercetin and other bioactive compounds with potential antiviral effects [J]. Plants (Basel, Switzerland), 2020, 9(12): 1638.

[3] 梁月光,郭恬静,程雪玲,等.苦荞和燕麦同步熟化工艺及抗氧化活性研究[J].中国调味品,2025,50(1):10-14+20.

[4] YANG J, LEE J, SUNG J. Influence of acid treatment on flavonoid content and biological activity in tartary buckwheat grains and its application for noodles [J]. LWT, 2021, 145: 111488.

[5] GAO J, KREFT I, CHAO G, et al. Tartary buckwheat *(Fagopyrum tataricum* Gaertn.) starch, a side product in functional food production, as a potential source of retrograded starch [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 552-558.

[6] FARHAN S, MUHAMMAD A, ALI I, et al. Exploring the amino acid composition and vitamin-B profile of buckwheat varieties [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): e15743.

[7] YANG X, ZHU A, LI X, et al. Effects of extracted oil of fermented tartary buckwheat on lipid-lowering, inflammation modulation, and gut microbial regulation in mice [J]. Food & Function, 2023, 14(24): 10814-10828.

[8] 宋盼盼,张艳红,温青云,等.不同熟化方式对苦荞粉品质的影响[J].中国调味品,2022,47(2):41-45.

[9] SUN X, LI W, HU Y, et al. Comparison of pregelatinization methods on physicochemical, functional and structural properties of tartary buckwheat flour and noodle quality [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 80: 63-71.

[10] BHINDER S, SINGH N, KAUR A. Impact of germination on nutraceutical, functional and gluten free muffin making properties of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107268.

[11] LIU F, HE C, WANG L, et al. Effect of milling method on the chemical composition and antioxidant capacity of tartary buckwheat flour [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2018, 53(11): 2457-2464.

[12] WANG J L, WU Y X, HAN M R, et al. Effect of environment and variety on the physicochemical properties of tartary buckwheat starch [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(5): 2413-2424.

[13] ZHOU T, LE L, WANG Q, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of different cultivars of tartary buckwheat in different regions [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 146: 107859.

[14] 刘琴,张薇娜,朱媛媛,等.不同产地苦荞籽粒中多酚的组成、分布及抗氧化性比较[J].中国农业科学,2014,47(14):2840-2852.

[15] JOYE I J. Dietary fibre from whole grains and their benefits on metabolic health [J]. Nutrients, 2020, 12(10): 3045.

[16] 黄兴富,黎其万,刘宏程,等.高效液相色谱法同时测定苦荞中芦丁、槲皮素和山柰酚的含量[J].中成药,2011,33(2):345-347.

[17] 葛飞.制粉与挤压改性对青稞粉理化特性及饼干食用品质改良研究[D].南京:南京财经大学,2023.

[18] 郑发英,曾姗姗,刘思曼,等.黑苦荞淀粉与普通荞麦淀粉理化和结构性质的比较分析[J].食品与发酵工业,2024,50(10):160-168.

[19] 赵晓燕,张晓伟,王萌,等.馕制品中淀粉消化特性及生物活性物质的研究[J].中国粮油学报,2021,36(9):14-21.

[20] SANDHUK S, SINGH N. Relationships between selected properties of starches from different corn lines [J]. International Journal of Food Properties, 2007, 8(3): 481-491.

[21] WU W, LI Z, QIN F, et al. Anti-diabetic effects of the soluble dietary fiber from tartary buckwheat bran in diabetic mice and their potential mechanisms [J]. Food & Nutrition Research, 2021, 65: 4998.

[22] PENG L X, ZOU L, TAN M L, et al. Free amino acids, fatty acids, and phenolic compounds in tartary buckwheat of different hull colour [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2017, 35(3): 214-222.

[23] LUO S, WANG K, LI Z, et al. Salicylic acid enhances cadmium tolerance and reduces its shoot accumulation in *Fagopyrum tataricum* seedlings by promoting root cadmium retention and mitigating oxidative stress [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(23): 14746.

[24] WU Q, BAI X, ZHAO W, et al. De novo assembly and analysis of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Garetn.) transcriptome discloses key regulators involved in salt-stress response [J]. Genes, 2017, 8(10): 255.

[25] TIAN W, Wu C, TANG P, et al. Effect of bran backfilling on the quality and nutritional properties of extruded tartary buckwheat noodles [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 117: 103909.

[26] 朱智慧,温东,张栋,等.紫外光促进苦荞中黄酮类化合物积累的分子机制探究[J].中草药,2021,52(5):1448-1453.

[27] GUO X D, MA Y J, PARRY J, et al. Phenolics content and antioxidant activity of tartary buckwheat from different locations [J]. Molecules, 2011, 16(12): 9850-9867.

[28] 徐浪,张继斌,石卫标,等.不同产地苦荞和种植土壤资源考察分析[J].作物杂志,2024,6:78-83.

[29] 章洁琼,邹军,卢扬,等.不同荞麦品种主要功能成分分析及评价[J].种子,2020,39(2):107-112.

[30] GRAZYNA P, ELZBIETA G, JOANNA K, et al. Bioactive compounds in different buckwheat species [J]. Plants, 2021, 10(5): 961.

[31] WANG M, YU L, GAO M, et al. Phenolics content and antioxidant activity of tartary buckwheat from different locations [J]. Molecules, 2011, 16(12): 9850-9867.

[32] WANG D, YANG T, LI Y, et al. Light intensity-a key factor affecting flavonoid content and expression of key enzyme genes of flavonoid synthesis in tartary buckwheat [J]. Plants, 2022, 11(16): 2165.

[33] YUAN H, WANG Q, TAN J, et al. Ionic titanium is expected to improve the nutritional quality of tartary buckwheat sprouts through flavonoids and amino acid metabolism [J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140907.

[34] JEON J, BAEK S A, KIM N S, et al. Elevated ozone levels affect metabolites and related biosynthetic genes in Tartary buckwheat [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(50): 14758-14767.

[35] DZIEDZIC K, ARIYARATHNA P, SZWENGIEL A, et al. Changes in the content of dietary fiber, flavonoids, and phenolic acids in the morphological parts of *Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn under drought stress [J]. Molecules, 2025, 30(2): 270.

[36] WANG J, LI Y, GUO X, et al. A review of the impact of starch on the quality of wheat-based noodles and pasta: from the view of starch structural and functional properties and interaction with gluten [J]. Foods, 2024, 13(10): 1507.

[37] GUAN E, YANG Y, PANG J, et al. Ultrafine grinding of wheat flour: effect of flour/starch granule profiles and particle size distribution on falling number and pasting properties [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(6): 2581-2587.

[38] ZHUANG J, ZHU J, CHEUNG P C K, et al. The physical and chemical interactions between starch and dietary fiber: Their impact on the physicochemical and nutritional properties of starch[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 149: 104566.

[39] ZHANG R, HE X, XIONG L, et al. Effects of the interaction between konjac glucomannan and starch on the physicochemical properties, recrystallization characteristics, and digestibility of starch: A review [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110840.

[40] GOMANDS V, LAMBERTS L, VISSERRG F, et al. Physicochemical properties of potato and cassava starches and their mutants in relation to their structural properties [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 24(4): 424-433.

[41] WU D-T, LIU W, HAN Q-H, et al. Physicochemical characteristics and antioxidant activities of non-starch polysaccharides from different kiwifruits [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 891-900.

[42] MUBANGA C S, SEYOUMW T, GEREMEW B, et al. Progress in research and applications of cassava flour and starch: a review [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(6): 2799-2813.

[43] 刘紫薇.热处理条件下绿豆淀粉与多酚复合物的特性研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.

[44] JOHN M, SUMAN M. *In vitro* digestive analysis of digestible and resistant starch fractions with concurrent glycemic index determination in whole grain wheat products minimally processed for reduced glycaemic impact [J]. Foods, 2022, 11(13): 1904.

[45] ZHU S, SHAO F, OBADI M, et al. Enhancing *in vitro* starch digestion of tartary buckwheat: unveiling the vital role of endogenous polyphenols in starch fine structure [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 116: 103870.

[46] LI Y, GAO S, JI X, et al. Evaluation studies on effects of quercetin with different concentrations on the physicochemical properties and *in vitro* digestibility of tartary buckwheat starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1729-1737.