

萌发苦荞粉的加工和消化特性分析

白永亮¹, 谢静¹, 李托雯¹, 王海燕¹, 田天娥², 白卫东^{3*}

(1. 佛山科学技术学院食品科学与工程学院, 广东佛山 528000) (2. 中山市南方新元食品生物工程有限公司, 广东中山 528436) (3. 仲恺农业工程学院食品科学与工程学院, 广东广州 510225)

摘要: 为探索萌发苦荞粉在食品中的应用, 该文研究了苦荞萌发过程中水分含量的变化, 并以苦荞原粉为对照, 分析了萌发苦荞粉的加工特性(冻融稳定性、凝胶能力、水合特性和透明度)、体外消化模拟过程中还原糖释放率、淀粉的组成以及估计血糖生成指数。结果表明, 苦荞含水率在萌发 0~3 h 时迅速增加, 并随着时间的延长而缓慢提高; 萌发处理显著降低了苦荞粉的冻融稳定性, 析水率达 18.94%, 为苦荞原粉的 3.01 倍。沉降体积降低了 11.30%, 表明凝胶能力增强。持水力和膨胀度有一定程度下降, 但溶解度显著提升, 增加了 26.70%。萌发苦荞粉的透光率为 4.29%, 相对于原粉降低了 0.38%; 在浸泡 15 h、萌发 12 h 内还原糖释放量持续增大, 随后呈下降趋势, 最大释放量分别为 13.85% 和 10.67%; 20 °C 下浸 40 h 后, 在 25 °C、湿度 80% 和光照强度 7500 Lx 的条件下萌发 48 h, 苦荞淀粉的含量从 66.94% 下降到 59.43%, 快消化淀粉的含量提高至 85.69%, 抗性淀粉含量降低至 9.45%; 萌发苦荞粉的消化速率显著提高, 最终水解率达到 92.80%, 但水解指数(88.24)和估计血糖生成指数(88.15)上升不显著。因此, 萌发苦荞粉相比于苦荞原粉具有更好的凝胶性、溶解性和消化性, 适用于制凝胶类和易消化类食品, 该研究为萌发苦荞食品的开发提供了一定的理论依据。

关键词: 萌发; 苦荞; 消化; 估计血糖生成指数

文章编号: 1673-9078(2022)09-236-244

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.9.1235

Analysis on Processing and Digestion Characteristics of Germinated

Tartary Buckwheat Powder

BAI Yongliang¹, XIE Jing¹, LI Tuowen¹, WANG Haiyan¹, TIAN Tiane², BAI Weidong^{3*}

(1.College of Food Science and Engineering, Foshan University of Science and Technology, Foshan 528000, China)
(2.Zhongshan Nanfang Xinyuan Food Bioengineering Co. Ltd., Zhongshan 528436, China) (3.College of Food Science and Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: To explore the application of germinated Tartary buckwheat powder in food, moisture content changes during Tartary buckwheat germination were studied. The processing characteristics of germinated Tartary buckwheat powder, such as its freeze-thaw stability, gel-forming capacity, hydration characteristics, and transmittance, were analyzed and compared against those of normal Tartary buckwheat powder (control). In addition, the reducing sugar release rate during in vitro digestion simulation, starch composition, and the estimated glycemic index were measured. The results show that the moisture content of Tartary buckwheat increases rapidly in the initial stage of germination (0~3 h) and then continues to increase slowly. Germination significantly reduces the freeze-thaw stability of the Tartary buckwheat powder, and the water release rate reaches 18.94%, which is 3.01 times that of the original powder (control). The sedimentation volume decreases by 11.30%, indicating enhanced gel-forming capacity. Moreover, the water holding capacity and degree of swelling decrease, but the solubility increases significantly by 26.70%. The light transmittance of germinated Tartary buckwheat powder is 4.29%, which is 0.38% lower than that of the control. The release amounts of reducing sugars increase continuously in the first 15 h of soaking and the first 12 h of germination, reaching the

引文格式:

白永亮,谢静,李托雯,等.萌发苦荞粉的加工和消化特性分析[J].现代食品科技,2022,38(9):236-244

BAI Yongliang, XIE Jing, LI Tuowen, et al. Analysis on processing and digestion characteristics of germinated tartary buckwheat powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(9): 236-244

收稿日期: 2021-11-05

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515111061)

作者简介: 白永亮(1986-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 546232815@qq.com

通讯作者: 白卫东(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏和加工, E-mail: 767313893@qq.com

maximum release amount of 13.85% and 10.67%, respectively. Subsequently, the release amounts decline. The starch content of the Tartary buckwheat powder drops from 66.94% to 59.43% after soaking at 20 °C for 40 h and germination for 48 h at 25 °C, 80% humidity and 7500 Lx light intensity. The content of rapidly digestible starch increases to 85.69%, while the resistant starch content decreases to 9.45%. The germinated Tartary buckwheat flour digestion rate rises significantly, and the final hydrolysis rate reaches 92.80%. However, the hydrolysis index (88.24) and the estimated glycemic index (88.15) did not increase significantly. Therefore, compared with normal buckwheat powder, germinated buckwheat powder has better gel-forming capability, solubility, and digestibility; thus, it is applicable for preparing gelled and easily digestible food. The findings of this study provide a theoretical basis for the development of germinated buckwheat food.

Key words: germination; Tartary buckwheat; digestion; estimated glycemic index

苦荞麦 [*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.], 又名荞叶七、菠麦、乌麦或花荞等, 学名鞑靼荞麦, 与“何首乌、大黄”等同属蓼科^[1]。苦荞起源于中国和北亚地区^[2], 广泛种植于北部、西北部和东北部地区^[3], 具有生长周期短、抗逆性强以及生态适应性强等特性, 在农业生产中具有特殊的地位^[4]。苦荞营养价值高, 除了淀粉、蛋白质、脂肪以及镁、铁、锌等微量元素外^[5], 其主要功能性成分为黄酮类化合物, 如芦丁、槲皮素等。

谷物粉的加工特性和消化特性会直接影响产品的加工适宜性以及食品经食用后在人体内的消化及吸收情况, 最终会影响食品本身的嗜好特性。萌发作为一种有效改善物料加工性能和消化性的方法, 已经广泛应用于小麦、青稞、燕麦和绿豆等作物中。刘本国等^[6]研究发现, 萌发能够显著提高苦荞麦中的芦丁和总酚的含量, 特别是 γ -氨基丁酸和游离氨基酸。梁雨荷等^[7]在萌发青稞的研究中, 发现青稞萌发后的营养成分和生理活性都发生了显著改变, 其中 γ -氨基丁酸、多酚和黄酮含量显著增加, 但 β -葡聚糖的含量有所下降。Leite 等^[8]研究发现种子萌发能增加含水量、蛋白质和纤维, 降低了脂类、还原糖、单宁和酚类化合物的含量。也有研究指出, 萌发谷物加工特性和消化特性^[9-11]的改变主要归结于萌发过程中, 水分含量迅速升高, 细胞的生命代谢活动随之加快, 淀粉酶活性增强促使淀粉发生降解, 使淀粉的结构和组成发生变化^[10,12], 蛋白酶活性增强促使蛋白质的状态发生改变^[11,13]。

萌发苦荞麦黄酮类化合物含量高, 是未来苦荞功能性食品开发的良好原料。在苦荞食品开发过程中, 应充分考虑其加工特性和消化特性对食品品质的影响, 这有助于更科学地利用资源, 提高生产质量和效率。目前关于这方面的研究较少。周一鸣等^[11]主要研究了萌发苦荞粉颗粒特性与消化性研究, 揭示了萌发改变了苦荞淀粉粒径和结晶度, 结晶度增大, 血糖指数下降。本文着重研究萌发苦荞粉的冻融稳定性、凝胶能力、水合特性、透明度等加工特性, 并结合消

化特性进行分析, 为萌发苦荞在精深加工产品中的合理应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

苦荞籽粒: 产自云南昭通, 昭苦1号, 收获于2019年。次氯酸钠溶液、DNS 试剂, 均为分析纯, 西安风腾化工有限公司; 偏磷酸钠、氯化钠、磷酸二氢钾、氯化钾、氯化钙、碳酸氢钠、氢氧化钠, 均为分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司; 无水葡萄糖, 分析纯, 天津鼎盛鑫化工有限公司; 无水乙醇, 分析纯, 湖南江虹试剂有限公司; α -淀粉酶, 分析纯, 天津市大茂化学试剂厂; 胃蛋白酶、胰酶, 均为分析纯, 德国 Biofroxx 公司; 石油醚, 分析纯, 西陇科学股份有限公司。

GXZ-500D 恒温恒湿光照培养箱, 购于宁波东南仪器有限公司; 数显式电热恒温水浴锅, 购于上海博迅实业有限公司医疗设备厂; 紫外可见分光光度计, 购于上海现科分光仪器有限公司; THZ-82 水浴恒温振荡器, 购于常州亚特实验仪器有限公司; TH2-82A 型气浴恒温振荡器, 购于常州市化能实验仪器厂; TG16G 高速离心机, 购于常州金坛良友仪器有限公司; 微波快速水分测定仪, 购于德国 Sartorius 公司; Scientz-100F 真空冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; MM 400Retsch 研磨仪, 弗尔德(上海)仪器设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 样品制备

选取完整、均匀、饱满的苦荞籽粒, 清洗沥干后, 置于质量分数 5% 的 NaClO 溶液中浸泡 15 min, 在每个直径 15 cm 的培养皿中放入消毒好的苦荞籽粒 200 粒, 之后在 20 °C 下浸 40 h 取出, 此时发芽率为 26.6%, 千粒质量为 35.07 g; 然后置于恒温恒湿箱中 (25 °C、湿度 80%、光照强度 7 500 Lx) 萌发 48 h, 最终发芽

率为 94.20%，千粒质量为 40.60 g 立即液氮冷冻。将脱壳后的苦荞籽粒和萌发苦荞籽粒分别预冻 24 h 后，在 -40 °C、0.01 MPa 的条件下在真空冷冻干燥机中处理 24 h，在液氮保护下研磨粉碎，过 60 目筛，-4 °C 保存，备用。

淀粉含量测定参考参照 GB 5514-2008；蛋白质测定参考 GB 5009.5-2016；脂肪测定参考 GB 5009.6-2016；水分测定参考 GB 5009.3-2016；灰分测定参考 GB 5009.4-2016；黄酮含量测定参考《保健食品检验与评价技术规范》（2003 年版）。

表 1 苦荞原粉和萌发苦荞粉的主要营养物质含量

Table 1 Content of main nutrients of Tartary buckwheat powder and germinated Tartary buckwheat powder

样品	淀粉含量 (g/100 g)	支链淀粉 (g/100 g)	蛋白质含量 (g/100 g)	脂肪含量 (g/100 g)	水分含量 (g/100 g)	灰分含量 (g/100 g)	黄酮含量/(mg/100 g) (以芦丁计)
苦荞原粉	66.94±6.22	47.36±2.50	12.68±1.40	1.50±0.21	5.23±0.74	1.73±0.20	306.00±35.00
萌发苦荞粉	59.43±5.86	34.93±1.65	13.90±1.53	0.81±0.19	4.45±0.58	1.67±0.18	557.00±52.00

1.2.2 冻融稳定性的测定

参考何财安等^[9]的方法并稍作修改，取 3.00 g 样品于离心管中，加 50 mL 蒸馏水混匀，沸水浴加热 20 min 后冷却至室温，取 10 mL 溶液于塑料离心管 (m_1) 中，称重 (m_2)，置于 -20 °C 冰箱中冷冻 22 h 后取出，放于 30 °C 恒温水浴锅中解冻 2 h，在 3 000 r/min 条件下离心 20 min，弃上清液，反复冻融三次，称取沉淀物质量 m_3 ，按公式 (1) 计算析水率 (记为 X)。

$$X = \frac{m_2 - m_1 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (1)$$

1.2.3 沉降体积的测定

参考陈燕^[14]的方法并稍作改动，称取样品粉末加入 100 mL 容量瓶中，配制成 10 mg/mL 的粉乳，在沸水浴中煮沸并保温 15 min，保持体积不变，冷却至室温后倒入 100 mL 量筒中，静置 24 h 后测定沉降体积。

1.2.4 水合特性的测定

参考何财安等^[9]的方法并稍作修改，称取 0.10 g 样品加入到对应的 50 mL 离心管离心管中，加入 10 mL 蒸馏水混匀，90 °C 水浴中加热，振动搅拌 30 min，冷却，离心 (3 000 r/min) 20 min 后取上清液于铝盒 (m_1) 中，热风 105 °C 中烘至恒重 (m_2)，记录下层沉淀物的质量 (m_3)。通过公式计算持水力 (WHC)、溶解度 (WS)、膨胀性 (SP)。

$$C = \frac{m_3}{0.1} \quad (2)$$

$$J = \frac{m_2 - m_1}{0.1} \times 100\% \quad (3)$$

$$P = \frac{m_3}{0.1(1 - WS)} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

C ——持水力，g/g；

J ——溶解度，%；

P ——膨胀性，%。

1.2.5 透明度的测定

参考陈燕^[14]的方法并稍作改动，向烧杯内加入 100 mL 的蒸馏水，分别称取 1.00 g 样品加入到相对应的烧杯中，配制成 1% 的粉乳。沸水加热并搅拌 15 min，冷却至 25 °C。用蒸馏水作为参比溶液，在 620 nm 处测定透光率即透明度。

1.2.6 体外消化

本实验体外模拟消化采用被广泛认可的 Englyst 法，并稍作修改。分别称取 1 g 样品，加入装有 10 mL 生理盐水的 50 mL 离心管里，配制成质量浓度约 1 g/10 mL 的淀粉悬浮液。

(1) 口腔消化：往离心管中各加入 5 mL 模拟唾液于 37 °C 恒温水浴摇床以转速为 150 r/min 消化 2 min。

(2) 胃消化：口腔消化后加入 10 mL 模拟胃液，用 1 mol/L HCl 溶液调整 pH=2.0，37 °C 恒温水浴摇床 (150 r/min) 中消化 2 h。

(3) 肠消化：用 1 mol/L NaHCO₃ 溶液将体外模拟胃的 pH 值调节为 6.9，加入 6 mL 模拟肠液，于温度为 37 °C、转速为 150 r/min 恒温水浴摇床中消化 6 h，3 000 r/min 离心 5 min，取消化产物上清液进行还原糖含量的测定。

(4) 根据消化率的速度和程度，淀粉被分为快消化淀粉 (RDS)、慢消化淀粉 (SDS) 和抗性淀粉 (RS)，分别取出在体外模拟消化中的肠消化阶段消化 20 min 和 120 min 时的水解液各 0.50 mL，加入无水乙醇灭酶，离心处理 (3 000 r/min) 后的上清液测定葡萄糖含量，淀粉含量为葡萄糖值乘以转化因子 0.9，每样测定 3 个平行。计算公式如下：

$$H_{RDS} = \left[(G_{20} - FG) \times \frac{0.9}{TS} \right] \times 100\% \quad (5)$$

$$H_{SDS} = \left[(G_{120} - G_{20}) \times \frac{0.9}{TS} \right] \times 100\% \quad (6)$$

$$H_{RS} = \left[(TG - FG) \times \frac{0.9}{TS} \right] \times 100\% - H_{RDS} - H_{SDS} \quad (7)$$

式中:

H_{RDS} ——RDS 含量, % (质量分数);

H_{SDS} ——SDS 含量, % (质量分数);

H_{RS} ——RS 含量, % (质量分数);

G_{20} 、 G_{120} ——20、120 min 内水解产生的还原糖含量, mg;

TG ——样品中总还原糖含量, mg;

TS ——总淀粉含量, mg;

FG ——酶水解前样品中游离还原糖含量, mg。

(5) 还原糖含量测定: 3,5-二硝基水杨酸法^[15]。

1.2.7 淀粉水解率、估计血糖生成指数的计算

参考 Goni 等^[16]方法测定苦荞的估计血糖生成指数, 计算萌发苦荞粉、苦荞原粉和参考食品(白面包)在 0~180 min 期间淀粉水解曲线下的面积 ($AUC_{\text{样品}}$ 和 $AUC_{\text{参考}}$)。在肠消化阶段的 0、2、5、10、20、30、60、120 和 180 min 等时间点, 各取 1 mL 样品于离心管, 沸水浴灭酶 5 min 后离心取上清液测定还原糖含量。

按照下式计算淀粉的水解率。

$$S = \frac{D \times 0.9}{H_{\text{总}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

S ——淀粉水解率, %;

D ——取样时间点消化的葡萄糖当量;

$H_{\text{总}}$ ——总淀粉含量, g/100 g。

以时间作为横坐标, 淀粉水解率作为纵坐标绘制水解率曲线。计算萌发苦荞样品、原苦荞样品和参考食品(白面包)在 0~180 min 期间淀粉水解曲线下的面积 ($AUC_{\text{样品}}$ 和 $AUC_{\text{参考}}$), 得出各样品淀粉水解指数 (HI)。样品的估计血糖生成指数 (eGI) 按照以下公式计算。

$$HI = \frac{AUG_{\text{样品}}}{AUG_{\text{参考}}} \quad (9)$$

$$eGI = 39.71 + 0.549 \times HI \quad (10)$$

1.3 数据统计与分析方法

所有实验均做三组平行实验, 数据分析采用 SPSS 26 软件分析各组实验数据差异显著性 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 苦荞籽粒萌发过程中含水率的变化



图1 萌发过程中的苦荞籽粒

Fig.1 Tartary buckwheat seeds during germination

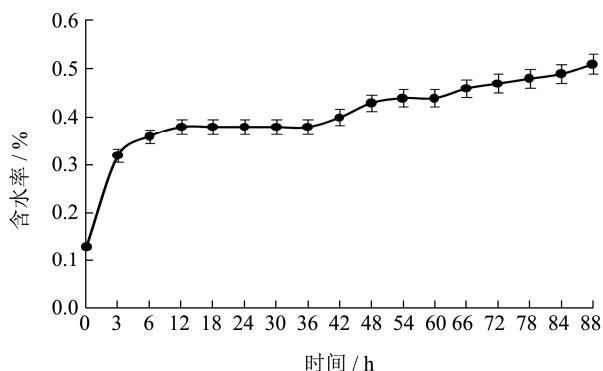


图2 苦荞萌发过程中的含水率

Fig.2 Water content of Tartary buckwheat during germination

苦荞的萌发过程本质上是一种吸水的过程, 因此水分在苦荞萌发中的物质代谢至关重要。图2为苦荞的含水率曲线, 显示了苦荞籽粒萌发过程中含水率变化趋势: 当萌发时间为 0~6 h, 已有少量苦荞籽粒萌发, 种子的含水率迅速增加。种子的含水率随着浸泡于水中的时间的增长而增大, 萌发期间苦荞籽粒快速吸水, 内源酶活性被激活, 物质代谢速率发生变化, 从而导致内部物质性质和消化率发生改变。赵雪莹^[17]

和曹勇等^[18]研究表明, 水分含量和水分状态对淀粉热特性、膨胀度以及冻融稳定性均有影响。因此, 水分在萌发过程中进入籽粒后的存在状态(如自由水、结合水)及内部成分结构的变化对于后期干燥得到的苦荞粉加工特性和消化特性有一定影响。

2.2 萌发处理对苦荞冻融稳定性的影响

冻融稳定性与淀粉分子的回生密切相关, 是用来评判高淀粉食品品质优劣的重要指标。当淀粉凝胶反复冻融过程中, 分子重新排列导致水分子析出, 因此可用析水率反映淀粉的冻融稳定性, 析水率越小代表冻融稳定性越好^[19,20]。

由图3可知, 苦荞原粉经两次冻融析出水分, 平均析出水分 6.29%; 而萌发苦荞粉经一次冻融析出水分, 平均析出水分含量高达 18.94%, 为苦荞原粉的 3.01 倍。萌发苦荞粉的析水率显著高于苦荞原粉 ($p < 0.05$), 说明苦荞原粉的冻融稳定性更好。这是因为未经萌发的苦荞支链淀粉含量较多, 加热糊化后淀粉分子膨胀糊化形成较大空间阻隔, 持水能力较强

导致析水率较弱;而萌发苦荞粉的直链淀粉含量增加,直链淀粉分子间易于形成氢键,把淀粉结合的水排出,持水能力减弱导致析水率增大,冻融稳定性变差^[21]。这与陈春旭^[22]的试验结果相似。因此,苦荞原粉比萌发苦荞粉更适用于加工冷冻食品。

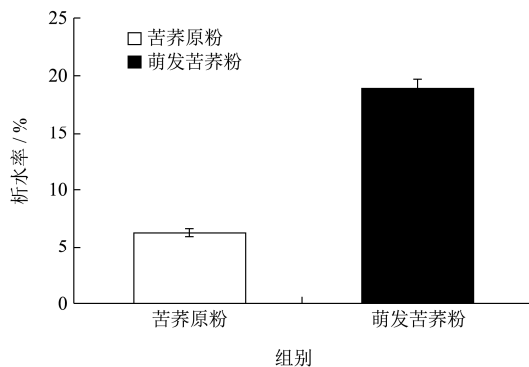


图3 苦荞原粉和萌发苦荞粉的析水率

Fig.3 Water extraction rate of Tartary buckwheat powder and germinated Tartary buckwheat powder

2.3 萌发处理对苦荞粉凝胶能力的影响

苦荞原粉糊与萌发苦荞粉糊的沉降体积如图4所示,沉降体积越小代表凝胶能力越强^[23]。可以看出,苦荞原粉淀粉糊的沉降体积显著高于萌发苦荞粉的沉降体积($p<0.05$),其中苦荞原粉淀粉糊的沉降体积为10.80 mL,而萌发苦荞粉淀粉糊的沉降体积为9.70 mL,降低了11.30%。这说明苦荞籽粒经过萌发处理后其凝胶能力增强。研究表明苦荞经过萌发后,其直链淀粉含量显著增加($p<0.05$)^[24],而直链淀粉含量越高,越容易发生沉降^[25],凝沉性更好,进而增强形成凝胶的能力^[26]。因此萌发苦荞粉的凝胶能力优于苦荞原粉。

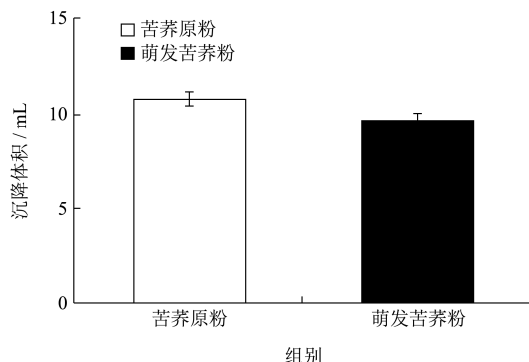


图4 苦荞原粉和萌发苦荞粉的凝胶能力

Fig.4 Gel ability of Tartary buckwheat powder and germinated Tartary buckwheat powder

2.4 萌发处理对苦荞粉水合特性的影响

萌发苦荞粉和苦荞原粉的水合特性以持水力、溶解度和膨胀度表示,结果见图5,它们与食品的质构、

感官和色泽等品质相关,进而影响着萌发苦荞粉在产品开发上的应用。苦荞经过萌发后,持水力显著降低($p<0.05$),其中苦荞原粉的持水力为11.00 g/g,而萌发苦荞粉的持水力为6.96 g/g,降低了7%。Kim等^[27]研究表明苦荞经过萌发后粗纤维含量显著下降,而王艺静^[28]认为持水力与粉体粗纤维含量具有直接的关系,当粉体粗纤维含量越低,其持水力也越低。此外,苦荞萌发过程中蛋白质和淀粉等大分子物质的降解,结构变疏松,也可能是其持水力下降的原因。因此,萌发苦荞粉在用于加工焙烤食品(如蛋卷、杏仁饼等)时颗粒容易出现松散现象。

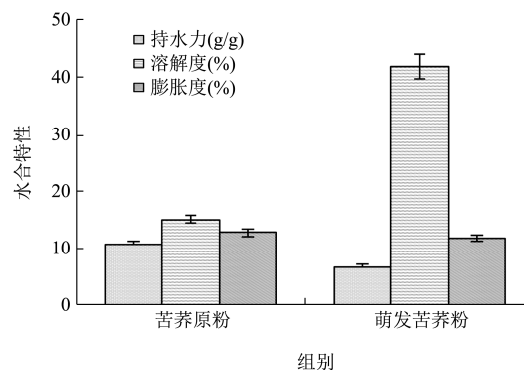


图5 苦荞原粉和萌发苦荞粉的水合特性

Fig.5 The hydration properties of Tartary buckwheat powder and germinated Tartary buckwheat powder

溶解度是指粉体中营养物质的溶解程度,溶解度越大则表明粉体中的可溶性营养成分越多。苦荞经过萌发88 h后,溶解度显著上升($p<0.05$),其中苦荞原粉的溶解度为15.30%,而萌发苦荞粉的溶解度为42.00%,增加了26.70%。陈春旭等^[22]实验表明,苦荞淀粉溶解度在萌发2 d后呈现上升趋势,与本实验结果相似。研究表明,苦荞粉的溶解度与其淀粉颗粒结构、直链淀粉与支链淀粉的比例、可溶性营养成分等相关^[29]。此外,溶解度大的粉体的深加工产品在蒸煮加工过程中容易出现糊汤现象^[6],因此萌发苦荞粉及其深加工产品不适合应用于蒸煮加工中。

膨胀度是一个评价粉体颗粒吸水过程中膨胀能力的指标^[30]。苦荞经过萌发后,膨胀度下降,其中苦荞原粉的膨胀度为12.98%,而萌发苦荞粉的膨胀度为12.00%,降低了0.98%。陈春旭等^[22]研究表明,萌发2 d的淀粉膨胀度相对于干样有显著的增加($p<0.05$),为干样的150%,继续萌发有回落的趋势,但其膨胀度仍较干样的膨胀度高,这与本实验结果稍有差异,表现为本实验萌发苦荞粉的膨胀度降低。苦荞粉中的主要成分为淀粉,其中直链淀粉含量越高,淀粉的膨胀度越小^[31]。同时支链淀粉形成的微晶区域被破坏,胶束网状结构相对较弱,稳定性变差从而提高了颗粒的膨胀程

度。综上，苦荞萌发后由于颗粒内部结构较弱，支链淀粉含量降低，直链淀粉含量越高，水分子不能与淀粉、蛋白质等大分子结合，导致水合特性较弱。相比苦荞原粉，萌发苦荞粉可能更适用于在高水分食品中。

2.5 萌发处理对苦荞粉透明度的影响

透明度是影响加工产品品质的重要因素之一，反映了淀粉与水的互融能力、淀粉的质量、直链淀粉与支链淀粉的比例等^[32]。由图6可知苦荞经过萌发后，透光率下降，其中苦荞原粉的透光率为4.67%，而萌发苦荞粉的透光率为4.29%，降低了0.38%。丁卫英等^[33]研究表明萌发黑苦荞淀粉糊的透明度低于原苦荞，与本实验结果相似。这可能是萌发苦荞粉糊化后淀粉颗粒结构进一步被破坏，直链淀粉增加导致回生速度加快，形成的胶束较多，光线发生散射，透明度降低。

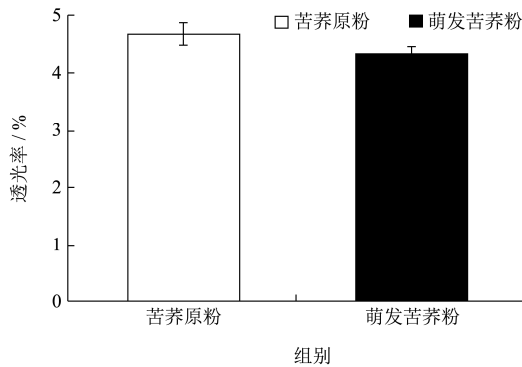


图6 苦荞原粉和萌发苦荞粉的透光率

Fig.6 Light transmittance of Tartary buckwheat powder and germinated Tartary buckwheat powder

2.6 萌发时间对苦荞粉体外消化特性的影响

由图7可知，浸泡时间是影响苦荞对营养物质的吸收和利用的主要因素，当浸泡时间过短，水分及相关营养成分不足以满足苦荞的生长需求，且各种内源酶活性较低。但浸泡时间过长时会对苦荞细胞内部结构造成不可逆的破坏，阻碍苦荞在萌芽时对营养物质的利用。随着苦荞籽粒浸泡时间延长，苦荞经消化后还原糖的含量呈先增加后下降的趋势。浸泡过程中还原糖含量增加的原因可能是淀粉颗粒浸泡后膨胀，种子中的淀粉酶被激活或合成，将淀粉等大分子物质分解，减少淀粉络合物的形成，从而提高苦荞粉的消化率，还原糖释放量提高。萌发后期还原糖含量明显增加，可能是淀粉、纤维素等大分子的降解提高了苦荞的消化性。黄升谋等^[34]研究小麦种子萌发过程中糖类的变化中，在小麦种子萌发前12h时还原糖含量平缓上升，12h时后还原糖含量上升较快速，而萌发40h时以后还原糖含量呈下降趋势，与本实验结果相似。

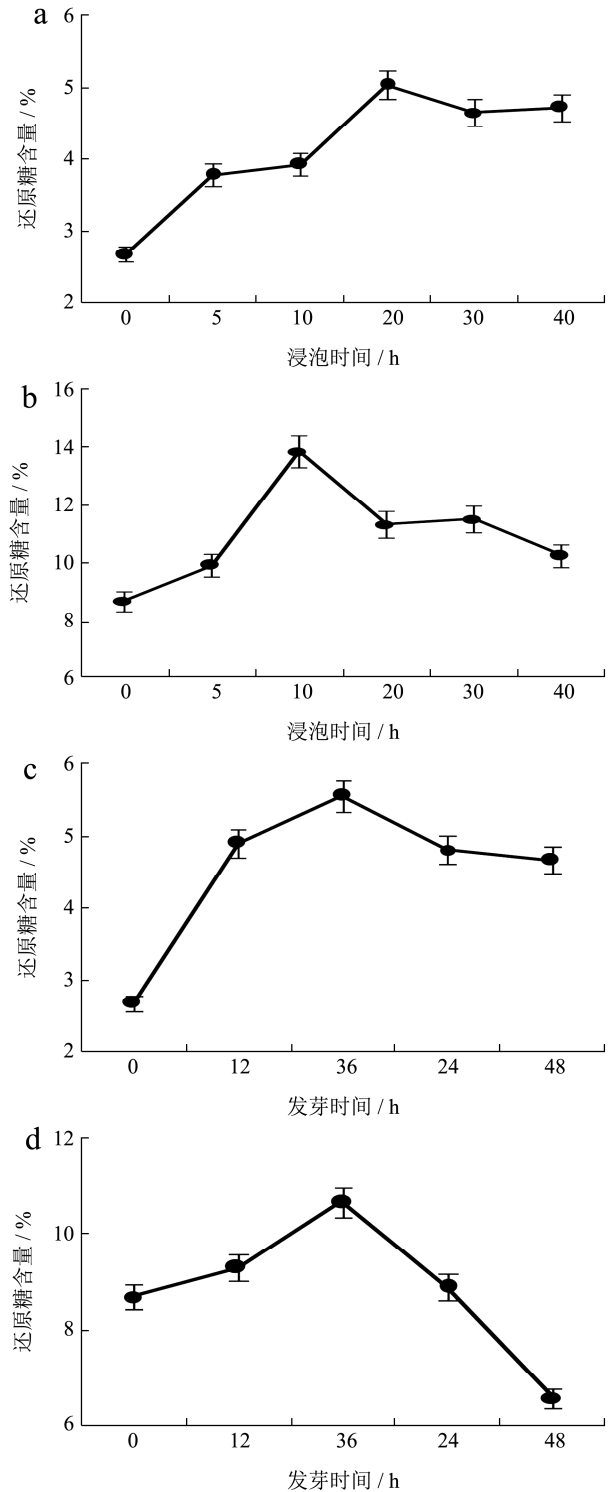


图7 浸泡、发芽时间对苦荞粉还原糖释放的影响

Fig.7 Effect of soaking and germination time on reducing sugar release of Tartary buckwheat powder

注：a、b 分别表示浸泡过程中苦荞体外模拟胃、肠消化；c、d 分别表示发芽过程中的苦荞体外模拟胃、肠消化。

2.7 萌发处理对苦荞淀粉含量和组成的影响

由表2可以看出，萌发苦荞粉与苦荞原粉的总淀粉含量有显著差异 ($p < 0.05$)，从66.94%下降到

59.43%，下降了 7.51%，表明萌发过程伴随着淀粉分解。萌发苦荞的快消化淀粉比原苦荞的含量显著提高 ($p < 0.05$)，达到 85.69%；慢消化淀粉含量无显著变化 ($p > 0.05$)，而抗性淀粉中萌发苦荞显著低于原苦荞 ($p < 0.05$)。周一鸣等^[11]研究表明，随着萌发时间的增加，苦荞淀粉中的总淀粉含量与直链淀粉含量均不断减少。部分 RS 在萌发过程中转化为慢消化淀粉，慢消化淀粉的比例由 7.58% 上升到 18.70%，提高了 2.47 倍，与本实验结果稍有差异，表现为本实验中 SDS

的比例下降，原因可能与萌发工艺控制不同或品种差异有关。周一鸣等^[11]采用的原料为山西黑丰 1 号，消毒后浸泡 12 h，在室温下催芽 24 h，然后播种在苗盘内基质，每天用 15 W 紫外灯照射 15 min，在环境湿度为 80%~90%，温度为 25~30 °C 的条件下萌发 4 d 得到萌发苦荞，与本文萌发工艺存在明显差异。因此，本实验中苦荞淀粉的降解主要表现为抗性淀粉的降解，萌发过程中慢消化淀粉和抗性淀粉转化为快消化淀粉。

表 2 萌发 88 h 对苦荞中淀粉含量和组成的影响

Table 2 Effect of germination for 88 h treatment on the content composition of Tartary buckwheat starch

样品	总淀粉含量/(g/100 g)	快速消化淀粉/%	慢消化淀粉/%	抗性淀粉/%
苦荞原粉	66.94±0.85 ^a	74.07±2.30 ^a	6.09±0.19 ^a	19.84±2.33 ^a
萌发苦荞粉	59.43±1.33 ^b	85.69±1.80 ^b	4.87±0.99 ^a	9.45±2.55 ^b

注：同列不同的字母表示 $p < 0.05$ 的显著性差异，下同。

2.8 萌发处理对苦荞淀粉水解率、估计血糖生成指数的影响

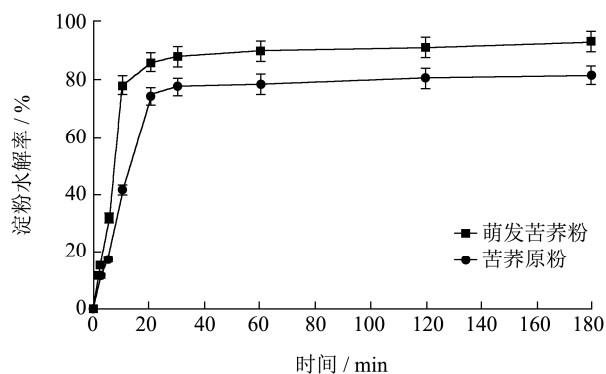


图 8 苦荞原粉和萌发苦荞粉的淀粉水解率

Fig.8 Starch hydrolysis rate of Tartary buckwheat powder and germinated Tartary buckwheat powder

由图 8 可以看到，萌发苦荞粉和苦荞原粉的水解率有显著的坡度和差值，且在水解初期就能达到较高的程度，消化至 20 min 逐渐达到平衡，水解趋势大致一致。萌发苦荞粉比苦荞原粉的水解率高，达到 92.80%，且相对于苦荞原粉也较快进入平衡状态，在消化至 20 min 前，萌发苦荞粉水解速率显著高于苦荞原粉 ($p < 0.05$)，在进入平衡状态后，萌发苦荞粉的水解率无显著变化 ($p > 0.05$)。说明萌发苦荞粉的水解速度比苦荞原粉更快，水解程度更高。王鹏等^[35]研究荞麦等杂粮淀粉体外消化特性的分析中，水解曲线与本实验的曲线较为相似，但研究中在反应 90 min 后方才进入平衡状态，而本实验则在 20 min 后进入，两者的时间差距可能体现在样品消化前的处理方式不同。王鹏等采用了蒸煮、微波加热及加压处理后，

加入酶液进行消化。

血糖生成指数是评估淀粉类食品消化情况的重要指标，由表 3 可知萌发苦荞粉的估计血糖生成指数高于苦荞原粉但无显著变化 ($p > 0.05$)，二者的 eGI 值均高于 70，与马雨洁等^[36]研究的熟制挤压荞麦面条结果相似。结合苦荞原粉和萌发苦荞粉中淀粉组成的变化， eGI 值可能与萌发过程中抗性淀粉和慢消化淀粉的降解有关。此外，影响食物 eGI 值的因素还有很多，例如食品的加工方式、食物的质构和食物中的抗营养成分等。

表 3 苦荞原粉和萌发苦荞粉的估计血糖生成指数

Table 3 Estimated glycemic index of Tartary buckwheat powder and germinated Tartary buckwheat powder

样品	水解指数(HI)/%	估计血糖生成指数(eGI)/%
苦荞原粉	76.25±2.10 ^a	81.57±1.15 ^a
萌发苦荞粉	88.24±2.16 ^a	88.15±1.19 ^a

3 结论

苦荞经过萌发后，其加工特性和消化特性均发生了一定的变化。在加工特性的研究中，萌发苦荞粉的冻融稳定性、持水力、膨胀度和透明度均显著低于苦荞原粉，溶解度和凝胶能力高于苦荞原粉。因此，可以通过萌发或其他改性方法来改变苦荞中的淀粉结构，进一步改善其加工特性，使其适用于不同的产品中。在消化特性方面，萌发苦荞粉的快消化淀粉含量高于原粉，慢消化淀粉含量变化不显著，抗性淀粉显著低于原粉；淀粉水解速率、水解程度以及 eGI 值均高于苦荞原粉，表明萌发苦荞粉具有更好的消化性，可用于制作高营养易消化的食品。萌发改变苦荞粉的营养成分、加工特性和消化特性，从而影响萌发苦荞

粉在食品中的应用。因此,深入开展萌发苦荞粉加工特性与消化特性的相关研究,对于萌发苦荞功能食品开发应用具有重要的意义。

参考文献

- [1] Y Z Cai, H Corke, W D Li. Encyclopedia of Grain Science || Buckwheat [M]. Elsevier Ltd, Available online 28 November 2004: 120-128
- [2] 李玲,闫旭宇,王延峰.荞麦文献分析及相关进展研究[J].科技通报,2020,36(1):1-7
LI Ling, YAN Xuyu, WANG Yanfeng. Literature analysis of buckwheat and related progress studies [J]. Report of Science and Technology, 2020, 36(1): 1-7
- [3] 王红育,李颖.荞麦的研究现状及应用前景[J].食品科学,2004,10:388-391
WANG Hongyu, LI Ying. Research status and application prospect of buckwheat [J]. Food Science, 2004, 10: 388-391
- [4] Li S Q, Zhang Q H. Advances in the development of functional foods from buckwheat [J]. Critical Reviews in Food Technology, 2001, 41(6): 14
- [5] 尤玲玲,刘幻幻,李晓雁,等.苦荞黄酮的纯化及抗氧化活性的研究[J].中国粮油学报,2014,8(29):23-27
YOU Lingling, LIU Huanhuan, LI Xiaoyan, et al. Study on purification and antioxidant activity of flavonoids from Tartary buckwheat [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2014, 8(29): 23-27
- [6] 刘本国,陈永生,高海燕,等.苦荞麦萌发过程中活性成分的变化[J].粮油加工,2010,3:48-50
LIU Benguo, CHEN Yongsheng, GAO Haiyan, et al. Changes of active components of Tartary buckwheat during germination [J]. Cereals and Oils Processing, 2010, 3: 48-50
- [7] 梁雨荷,杨希娟,党斌.萌发青稞的研究现状及展望[J].青海农林科技,2018,3:51-55
LIANG Yuhe, YANG Xijuan, DANG Bin. Research status and prospects of barley germination [J]. Qinghai Agriculture and Forestry Science and Technology, 2018, 3: 51-55
- [8] Leite D, Queiroz A, Figueirêdo R, et al. Germination impact in the nutrition and technological properties of jackfruit seeds [J]. Journal of Agricultural Studies, 2020, 8(1): 79-100
- [9] 何财安,张珍,王丽静,等.磨粉方式对苦荞粉粉质特性及体外消化特性的影响[J].中国粮油学报,2017,32(5):19-25,49
HE Caian, ZHANG Zhen, WANG Lijing, et al. Effects of grinding methods on the properties of Tartary buckwheat powder and its *in vitro* digestion [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 32(5): 19-25, 49
- [10] 王倩雯.芸豆萌发过程中营养成分、淀粉理化特性变化及相关性研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2015
WANG Qianwen. Study on nutrient composition and physicochemical properties of starch in kidney bean during germination [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015
- [11] 周一鸣,王宏,崔琳琳,等.萌发苦荞淀粉的理化特性及消化性研究[J].中国粮油学报,2017,32(3):25-29,35
ZHOU Yiming, WANG Hong, CUI Linlin, et al. Study on physicochemical properties and digestibility of Tartary buckwheat starch [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 32(3): 25-29, 35
- [12] Benítez V, Cantera S, Aguilera Y, et al. Impact of germination on starch, dietary fiber and physicochemical properties in non-conventional legumes [J]. Food Research International, 2013, 50(1): 64-69
- [13] Kim S L, Lee J E, Kwon Y U, et al. Introduction and nutritional evaluation of germinated soy germ [J]. Food Chemistry, 2013, 136(2): 491-500
- [14] 陈燕.苦荞抗性淀粉的制备、理化性质及其应用研究[D].成都:西华大学,2017
CHEN Yan. Study on preparation, physicochemical properties and application of Tartary buckwheat resistant starch [D]. Chengdu: Xihua University, 2017
- [15] 张小贝,朱国鹏,祝志欣,等.利用 3,5-二硝基水杨酸法测定菜用甘薯叶中的多糖含量[J].热带生物学报,2017,8(3):359-363,377
ZHANG Xiaobei, ZHU Guopeng, ZHU Zhixin, et al. The content of polysaccharide in vegetable sweet potato leaves was determined by 3,5-dinitrosalicylic acid method [J]. Journal of Tropical Biology, 2017, 8(3): 359-363, 377
- [16] Goni I, Garcia-Diz L, Manas E, et al. Analysis of resistant starch: a method for foods and food products [J]. Food Chemistry, 1996, 56(4): 445-449
- [17] 赵雪莹.不同水分含量制备所得预糊化大米淀粉性质的比较及在米糕中的应用[D].无锡:江南大学,2021
ZHAO Xueying. Comparison of properties of pregelatinized rice starch prepared with different moisture content and its application in rice cake [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021
- [18] 曹勇,许秀颖,赵城彬,等.新采收玉米籽粒中水分状态对淀粉热特性的影响[J].食品科学,2018,39(12):79-84
CAO Yong, XU Xiuying, ZHAO Chengbin, et al. Effect of moisture state on thermal properties of starch in newly harvested maize kernels [J]. Food Science, 2018, 39(12): 79-84

- [19] 任彬,张伍金,李锐.紫薯粉对面团冻藏期间品质的影响研究[J].食品科技,2015,40(8):155-160
REN Bin, ZHANG Wujin, LI Rui. Effect of sweet potato powder on quality of dough during frozen storage [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(8):155-160
- [20] Elkhalfi A E O, Bernhardt R. Some physicochemical properties of flour from germinated sorghum grain [J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 50(1): 186-190
- [21] 常悦.马铃薯粉对速冻水饺品质的影响研究[D].郑州:河南工业大学,2016
CHANG Yue. Effect of potato powder on quality of frozen dumpling [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016
- [22] 陈春旭,郭元新.苦荞发芽过程中淀粉的理化特性变化[J].食品科学,2015,36(13):69-73
CHEN Chunxu, GUO Yuanxin. Changes of physicochemical properties of starch in Tartary buckwheat during germination [J]. Food Science, 2015, 36(13): 69-73
- [23] Ashwar B A, Gani A, Shah A, et al. Preparation, health benefits and applications of resistant starch - a review [J]. Starch Stärke, 2016, 68(3-4): 287-301.
- [24] 张伟丽,白文明,王鹏科,等.不同提取方法对苦荞淀粉理化特性的影响[J].食品研究与开发,2018,39(6):28-33
ZHANG Liwei, BAI Wenming, WANG Pengke, et al. Effects of different extraction methods on physicochemical properties of Tartary buckwheat starch [J]. Food Research and Development, 2018, 39(6): 28-33
- [25] 赵全,岳晓霞,毛迪锐,等.四种常用淀粉物理性质的比较研究[J].食品与机械,2005,1:22-24
ZHAO Quan, YUE Xiaoxia, MAO Dirui, et al. Comparative study on physical properties of four commonly used starches [J]. Food and Machinery, 2005,1:22-24
- [26] 顾娟.荞麦淀粉理化特性及消化性研究[D].无锡:江南大学,2010
GU Juan. Study on physicochemical properties and digestibility of buckwheat starch [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010
- [27] Kim S L, Kim S K, Park C H. Introduction and nutritional evaluation of buckwheat sprouts as a new vegetable [J]. Food Research International, 2004, 37(4): 320-327
- [28] 王艺静.不同等级荞麦粉品质特性研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2017
WANG Yijing. Study on quality characteristics of buckwheat flour of different grades [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2017
- [29] 谢宏,韩颖.稻米成熟过程中淀粉理化性质变化研究[J].食品科技,2011,36(2):126-129
XIE Hong, HAN Ying. Study on physicochemical properties of starch during rice ripening [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(2): 126-129
- [30] 方玲.不同氨基酸对马铃薯淀粉特性影响的研究[D].武汉:华中农业大学,2012
FANG Ling. Effects of different amino acids on potato starch properties [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012
- [31] 杨慧萍,李常钰,王超超,等.发芽糙米淀粉理化特性研究[J].中国粮油学报,2012,27(4):38-43
YANG Huiping, LI Changyu, WANG Chaochao, et al. Study on physicochemical properties of germinated brown rice starch [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2012, 27(4): 38-43
- [32] 臧靖巍.青稞淀粉和蛋白质的化学组成及其工艺性质研究[D].重庆:西南农业大学,2015
ZANG Jingwei. Study on chemical composition and technological properties of barley starch and protein [D]. Chongqing: Agricultural University of Southwest, 2015
- [33] 杨春,丁卫英,周柏玲,等.发芽对黑小麦、黑苦荞淀粉物化特性的影响[J].中国粮油学报,2011,26(12):5-10
YANG Chun, DING Weiying, ZHOU Bailing, et al. Effects of germination on physicochemical properties of starch of black wheat and Tartary buckwheat [J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2011, 26(12): 5-10
- [34] 黄升谋,张宏波.小麦种子萌发过程中糖类的变化[J].湖北文理学院学报,2016,37(11):31-34
HUANG Shengmou, ZHANG Hongbo. Changes of carbohydrates during wheat seed germination [J]. Journal of Hubei University of Arts and Sciences, 2016, 37(11): 31-34
- [35] 王鹏,程志强,祖亿,等.杂粮淀粉体外消化特性的分析[J].食品科技,2017,42(10):170-174
WANG Peng, CHENG Zhiqiang, ZU Yi, et al. Analysis of *in vitro* digestibility of starch of cereals [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(10): 170-174
- [36] 马雨洁.熟制荞麦面条淀粉模拟消化特性及抗氧化品质研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2013
MA Yujie. Study on simulated digestion characteristics and antioxidant quality of cooked buckwheat noodle starch [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2013