

外源 GABA 联合超声处理发芽绿豆淀粉的结构特性及血糖指标变化

路乐乐¹, 刘莹¹, 徐海军², 李晓强¹, 隋春光³, 李晓红³, 王立东^{1,4*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319) (2. 内蒙古伊利实业集团股份有限公司, 内蒙古呼和浩特 010000) (3. 黑龙江农业经济职业学院食品药品工程系, 黑龙江牡丹江 157041) (4. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江省普通高等学校谷物副产物综合利用重点实验室, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 研究外源 γ -氨基丁酸 (γ -Aminobutyric Acid, GABA) 联合超声处理绿豆淀粉结构特性及血糖指标变化影响, 获得低 GI 值绿豆淀粉制品, 该文以不同萌发时间的绿豆淀粉为研究对象, 通过扫描电镜、X-射线衍射、傅里叶红外光谱等分析方法, 探讨外源 GABA 协同超声处理对绿豆淀粉萌发过程中结构特性和血糖指标影响。结果表明, 处理后, 绿豆中总淀粉含量从 52.13% 下降到发芽 96 h 的 21.18%; 发芽 12 h 时, 抗性淀粉含量达到 70.65%。发芽后绿豆淀粉颗粒形貌无显著变化。发芽后绿豆淀粉的相对结晶度由 39.64% 下降到 96 h 的 12.72%, 但发芽处理并未改变绿豆淀粉的结晶类型。发芽处理后绿豆淀粉没有产生新的基团, 但淀粉晶体结构的有序性降低。发芽后绿豆淀粉的凝沉性增强, 其抗消化能力也增强, 在发芽 12 h 时, 发芽绿豆淀粉的估计血糖生成指数达到了 22.52, 相较于未处理时的 27.13, 可起到减缓血糖升高的作用。外源 GABA 联合超声处理降低了总淀粉含量, 提高了抗性淀粉含量, 使绿豆淀粉的消化特性发生了显著变化, 为其在功能食品中的应用提供了理论依据。

关键词: 估计血糖生成指数; 发芽淀粉; 绿豆; 超声处理; γ -氨基丁酸

文章编号: 1673-9078(2024)02-205-212

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.2.0334

Changes in the Structural Characteristics and Glycemic Index of Mung Bean Starch Treated with Exogenous GABA and Ultrasound during Germination

LU Lele¹, LIU Ying¹, XU Haijun², LI Xiaoqiang¹, SUI Chunguang³, LI Xiaohong³, WANG Lidong^{1,4*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China) (2. Inner Mongolia Yili Industrial Group Co. Ltd., Hohhot 010000, China) (3. Department of Food and Drug Engineering, Heilongjiang Vocational College of Agricultural Economics, Mudanjiang 157041, China) (4. National Engineering and Technology Research Center for coarse Grains, Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Grain By-products in Colleges and Universities of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China)

引文格式:

路乐乐, 刘莹, 徐海军, 等. 外源 GABA 联合超声处理发芽绿豆淀粉的结构特性及血糖指标变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(2): 205-212.

LU Lele, LIU Ying, XU Haijun, et al. Changes in the structural characteristics and glycemic index of mung bean starch treated with exogenous GABA and ultrasound during germination [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(2): 205-212.

收稿日期: 2023-03-31

基金项目: 黑龙江省百千万工程重大科技专项 (2021ZX12B06); 中央引导地方科技发展专项 (DQKJJYD0001); 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目 (YJSCX2022-Y49)

作者简介: 路乐乐 (1999-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: lulele0510@163.com

通讯作者: 王立东 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 淀粉资源的深度加工与利用及谷物健康食品的研究与开发, E-mail: wanglidong-521@163.com

Abstract: The effects of exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) combined with ultrasonic treatment on the structural characteristics and glycemic index fluctuations of mung bean starch during germination were studied, and mung bean starch products with low glycemic index values were acquired. Mung bean starch was examined after different germination times using various analysis methods including scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and Fourier infrared spectroscopy. The results demonstrate that the total starch content of the mung beans decreased from 52.13%~21.18% after 96 h of germination. Moreover, after 12 h of germination, the resistant starch content reached 70.65%. The morphology of the mung bean starch granules did not change significantly during germination. After 96 h of germination, the relative crystallinity of the mung bean starch decreased from 39.64%~12.72%, but germination did not alter the crystal type of the mung bean starch. After germination, no new functional groups were produced, but the orderliness of the starch crystal structure was reduced. After germination, the retrogradation of the mung bean starch was enhanced, and its digestive resistance also increased. After 12 h of germination, the estimated glycemic index of the germinated mung bean starch reached 22.52, indicating that germination can slow the increase of the glycemic index of mung bean starch compared with untreated counterparts (which had a glycemic index of 27.13). Exogenous GABA combined with ultrasonic treatment reduced the total starch content while increasing the resistant starch content, and the digestive characteristics of the mung bean starch was remarkably modified. These findings provide a theoretical basis for the application of mung bean starch in functional foods.

Key words: estimation of glycemic index; germinated starch; mung beans; ultrasonic treatment; γ -aminobutyric acid

绿豆又名青小豆、植豆，是一类传统粗粮作物，在我国已有两千多年栽培历史^[1]。绿豆用途十分广泛，具有清热消暑^[2]、降脂解毒^[3]作用。绿豆中含有25%~28%蛋白质、50%~60%淀粉，以及多酚、黄酮、维生素等众多营养成分，因此绿豆具有极高营养价值^[4]。随着人们饮食逐渐精细化，亚健康人群比例逐年上升，健康饮食成为人们新的诉求。传统绿豆制品淀粉含量较高，易造成餐后血糖水平和胰岛素浓度大幅波动。为寻求GI值降低的绿豆淀粉制品，选择合适的加工处理工艺就显得尤为重要。

发芽处理是一种操作简单，成本低廉的加工方式。有研究表明，适当发芽处理可提高玉米中抗性淀粉含量^[5]，而抗性淀粉含量较高的食品可以显著抑制餐后血糖升高，为低GI食品的开发提供理论依据。GABA是一种非蛋白质氨基酸，广泛存在于植物和动物体中，它在植物生长中具有激活信号、调节蛋白质降解、促进植物激素合成等作用^[6]。超声处理可以提高种子发芽率，促进活性化合物的积累^[7]。研究发现，低强度超声的空化效应可以提高细胞壁和细胞膜的通透性，增强种子水合作用和酶活性，加快细胞内外物质交换及代谢速率^[8]。超声预处理空化作用在种子细胞壁上产生的微小孔隙可以促进GABA从外部向种子内部的转移，进而参与绿豆种子的代谢，提高淀粉酶和多酚合成酶的活性。

因为外源GABA浸泡处理可以激活水解酶活性，超声处理有利于提高细胞壁和细胞膜的通透性，所以本实验旨在研究外源GABA联合超声处理对发

芽0~96 h绿豆淀粉结构特性和血糖指标的影响，以期获得GI值低、感官性能良好的绿豆淀粉产品。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

绿豆种子购买于北大荒粮食集团有限公司（中国大庆）；次氯酸钠、GABA、氢氧化钠、乙酸钠、无水乙醇、无水葡萄糖和3,5-二硝基水杨酸购买于上海麦克林生化科技股份有限公司（中国上海）；猪胰液 α -淀粉酶、糖化酶购买于上海源叶生物科技有限公司（中国上海）。

1.2 仪器与设备

KH-500GDV超声波清洗器，昆山禾创超声仪器有限公司；HH-4型电热恒温水浴锅，江苏省金坛市宏华仪器厂；DHG-101-0A型电热恒温鼓风干燥箱，上海尚仪生物技术有限公司；CHA-2A气浴震荡器，常州申光仪器有限公司；ZXMP-R1230恒温恒湿培养箱，上海智城分析仪器制造有限公司；S-3400N扫描电子显微镜，日本HITACHI公司；BrukerD8 X-射线衍射仪，德国ADVANCE公司；Nicolet 6700傅里叶变换红外光谱仪，美国Thermo Fisher Scientific公司。

1.3 实验方法

1.3.1 绿豆发芽处理

选取大小均匀、无损伤的完整绿豆。将绿豆种

子在质量分数 0.5% 次氯酸钠溶液中浸泡 15 min, 用蒸馏水冲洗后沥干水分。将处理过的绿豆种子放入 250 mL 烧杯中, 按豆液比 1:3 加入 10 mmol/L GABA 溶液, 样品置于超声清洗器中处理 40 min 后再 30 °C 恒温处理 8 h。将浸泡好的绿豆放入发芽盘中, 发芽盘底部放置 10 mmol/L 的 GABA 溶液 500 mL, 然后将样品置于 30 °C 湿度 75% 的培养箱中, 孵育 12、24、48、72、96 h, 每 12 h 换一次 GABA 培养液。取样后用蒸馏水冲洗去除黏液, 45 °C 热风烘干保持恒重。将样品压碎并保存在 4 °C 的冰箱中。未处理的样品标记为 M, 而发芽 0、12、24、48、72 和 96 h 的样品分别标记为 M0、M12、M24、M48、M72 和 M96。

1.3.2 淀粉提取

精确称取 100.0 g 绿豆芽粉, 过用 80 目筛, 将样品置于 2 000 mL 烧杯中, 加入 1 500 mL 质量分数 0.4% NaOH 溶液并充分混合。然后将样品置于 35 °C 气浴振荡器中, 170 r/min 摇 2 h, 后静置 1 h, 调节 pH 值为 7.0, 去除上清液, 沉淀物用蒸馏水反复洗涤、离心, 并用 80 目尼龙纱布过滤, 得到纯净淀粉。淀粉在 40 °C 下干燥 24 h, 研磨后过 90 目筛得到发芽绿豆淀粉^[9]。

1.3.3 淀粉含量

淀粉含量采用 GB 5009.9-2016^[10]酸水解法测定。

1.3.4 直链淀粉和支链淀粉含量

采用高菲等^[11]的双波长法测定淀粉样品中的直链淀粉和支链淀粉含量。

1.3.5 扫描电镜分析

将少量绿豆淀粉样品用导电双面胶固定到金属样品台上, 在真空条件下进行喷金处理, 置于扫描电子显微镜下观察, 加速电压为 5 kV, 放大 3 000 倍观察样品形状和表面特征^[12]。

1.3.6 X-射线衍射分析

采用 X 射线衍射仪 (XRD), 通过步进扫描法检测淀粉, 检测条件: 特征射线 Cu 靶, 管压为 40 kV, 电流为 40 mA, 测量角度 2θ 区间为 4~60°, 步长为 0.02°, 扫描速度为 2°/min。使用 MDI Jade 软件分析计算淀粉结晶度, 结果取 3 次拟合平均值^[13]。

1.3.7 傅里叶红外光谱分析

称取被测样品 3.0 mg, 与 300.0 mg KBr 粉末研磨至混匀, 经压片处理后通过红外光谱分析仪进行全波段扫描测试, 波长范围为 400~4 000 cm^{-1} , 分

辨频率为 4 cm^{-1} , 扫描次数为 64 次^[14]。

1.3.8 凝沉性测定

制备不同发芽时间质量分数 1% 的淀粉糊 50 mL, 取 7 支 10 mL 塑料离心管, 向每支离心管中分别移取 10 mL 糊液, 在 25 °C 下静置 24 h 后, 再以转速 4 000 r/min 离心 5 min, 记录离心管中沉降物占比^[15]。

1.3.9 估计血糖生成指数的测定

淀粉用猪胰腺 α -淀粉酶和糖化酶进行模拟消化。将 600 mg (精确到 0.001 g) 淀粉准确称量到 30 mL 醋酸钠缓冲液 (pH 值 5.2) 中。将样品混合并在 95 °C 下糊化 15 min, 糊化后样品在 37 °C 恒温平衡 1 h。加入 5 mL 猪胰腺 α -淀粉酶 (100 U/mL) 和糖化酶 (40 U/mL) 混合物。在 37 °C 气浴中摇动样品 (170 r/min), 并在 10、20、40、60、90、120 和 180 min 时取样。加入无水乙醇终止消化, 以 4 000 r/min 离心 5 min^[16]。

准确称取 100.0 mg 葡萄糖, 溶于少量蒸馏水中, 并定容于 100 mL 容量瓶中, 分别移取 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 mL 葡萄糖标准溶液于 25 mL 容量瓶中, 加入蒸馏水定容至 2 mL, 然后加入 1.5 mL DNS 试剂并摇匀, 在沸水中加热 5 min, 迅速冷却定容至 25 mL, 混匀后于 540 nm 波长处测定吸光度^[16]。标准曲线为: $y=12.036x+0.0224$ ($R^2=0.9948$)。

以淀粉水解率 (HRS) 为纵坐标, 以时间为横坐标绘制水解曲线。通过计算 0~180 min 淀粉 (AUC_{sample}) 水解曲线下面积和参考食物 (白面包, $AUC_{\text{reference}}$) 来确定样品淀粉水解指数 (HI)。样品估计血糖指数 (eGI) 按照以下公式计算^[16]。

$$A=100-(0.9 \times \frac{G_{120}-B}{C} \times 100) \quad (1)$$

$$D=\frac{m_1 \times 0.9}{C} \times 100\% \quad (2)$$

$$E=\frac{S_{\text{sample}}}{S_{\text{reference}}} \quad (3)$$

$$I=39.71+0.594 \times E \quad (4)$$

式中:

A ——抗性淀粉含量 (RS), %;

G_{120} ——消化 120 min 时释放的葡萄糖含量, mg;

B ——消化 20 min 时释放的葡萄糖含量, mg;

C ——淀粉的质量, mg;

D ——淀粉的水解速率 (HRS), %;

m_1 ——在采样点消化的葡萄糖当量, mg;

E ——样品淀粉水解指数 (HI);

S_{sample} ——0~180 min 淀粉 (AUC_{sample}) 水解曲线下面积;

$S_{\text{reference}}$ ——参考食物(白面包, $AUC_{\text{reference}}$)水解曲线下面积;

I ——血糖指数(eGI)。

1.3.10 数据分析

每组实验均做三次平行试验,采用 SPSS 26 进行统计分析,Origin 2021 绘图,数据结果以平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与讨论

2.1 淀粉含量及组成

GABA 联合超声处理 12~96 h 绿豆的淀粉含量、直链淀粉、支链淀粉和抗性淀粉含量如图 1 所示。淀粉在绿豆种子中的占比较高,采用发芽处理降低淀粉含量,改善淀粉消化吸收速率,这对研究低 GI 绿豆食品有着重要的意义。Oliveira 等^[17]研究表明,发芽可改善稻米消化率,提高生物活性。Chinma 等^[18]研究表明,种子萌发在分子水平上显著改变了淀粉的结构,影响了淀粉的功能。根据图 1 可知,发芽绿豆中淀粉含量显著降低,绿豆中淀粉含量最初为 52.13%,随着发芽时间的延长,在发芽 24 h 降低至 43.54%,在 96 h 时降至最低为 21.18%。这种减少是由于超声处理后种皮的渗透性增强所致,因为超声处理可以改变细胞壁结构,提高内源酶活性,内源酶通过细胞壁释放,从而提高淀粉酶水解效率^[19]。

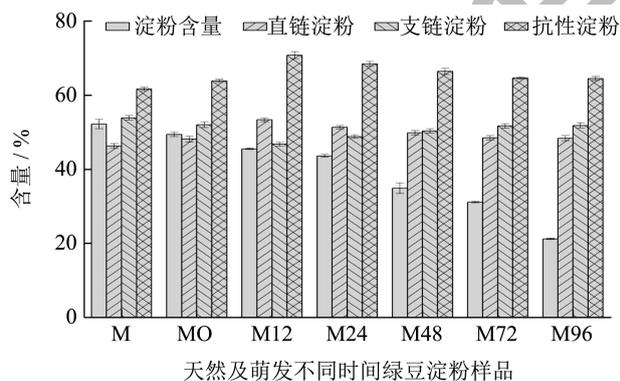


图 1 发芽绿豆中淀粉的含量和组成

Fig.1 The content and composition of starch in mung bean sprouts

研究表明,直链淀粉与支链淀粉比值的变化是延缓淀粉消化的有效方法^[17]。绿豆发芽过程显著提高了直链淀粉的占比,在发芽 12 h 达到峰值。这可能是水解酶优先裂解支链淀粉形成直链淀粉的结果^[20],而超声处理又增强了淀粉酶活性,加速了支链淀粉的水解,导致直链淀粉和抗性淀粉的比例增加。发芽后,抗性淀粉含量在萌发过程中呈上升趋势,这可能是由于淀粉水解酶将淀粉分解成糊精和

葡萄糖^[18]的原因。而抗性淀粉不易被淀粉酶水解,导致了 12 h 时抗性淀粉含量最高。随着发芽时间的增加,芽的生长需要淀粉水解提供能量,部分抗性淀粉开始水解,导致种子萌发后期抗性淀粉含量降低。

2.2 扫描电镜分析

天然绿豆淀粉和不同萌发时间绿豆淀粉的扫描电镜如图 2 所示。在 3 000 倍显微镜下观察淀粉颗粒主要呈椭圆形,形貌无显著性差异,部分颗粒不规则,呈肾形或心形。淀粉颗粒没有出现裂缝或孔洞,因此,延长发芽时间并没有导致绿豆淀粉颗粒的大量断裂。发芽后,部分淀粉颗粒变粗,有微蚀坑,但大部分完好无损,这可能是由于超声空化效应和淀粉酶、脱支酶活化水解淀粉造成的表面损伤^[21]。淀粉颗粒表面的破坏归因于发芽过程中淀粉的使用量增加^[18],水解酶在萌发过程中被激活,部分淀粉水解,使淀粉颗粒表面产生凹陷,这与王倩^[5]的研究结果一致。籽粒中直链淀粉与支链淀粉的比例可能是种子萌发过程中淀粉颗粒形态变化的主要原因,而直链淀粉水平较低的淀粉更容易受到酶的攻击,并产生更多的凹坑^[22]。

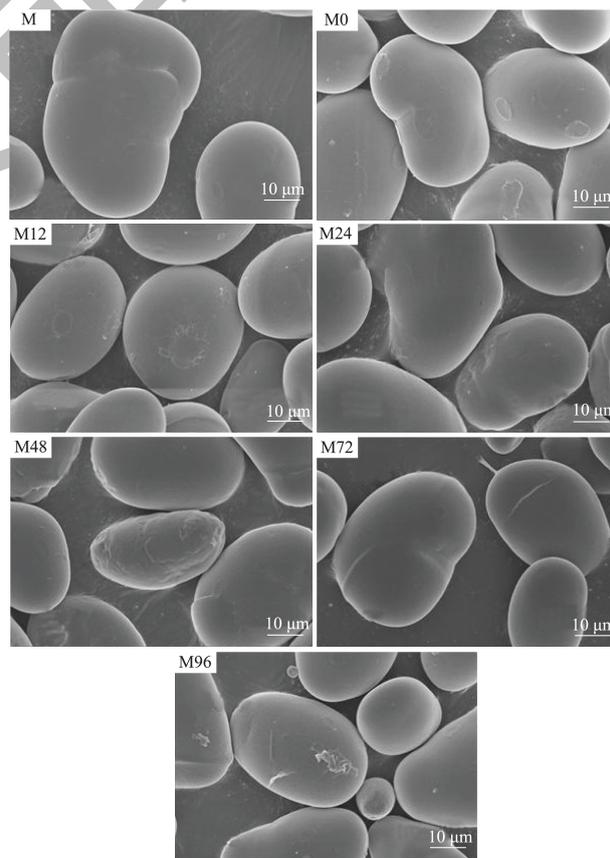


图 2 不同发芽时间绿豆淀粉的扫描电镜照片 ($\times 3\ 000$)

Fig.2 SEM pictures of mung bean starch at different germination times ($\times 3\ 000$)

2.3 X-射线衍射分析

天然绿豆淀粉和不同萌发时间绿豆淀粉的 XRD 谱图如图 3 所示。不同发芽时间的样品分别在 15°、17°、18°、20°和 23°处出现明显较强衍射峰，为典型的 A 型结构。不同发芽时间的绿豆淀粉其特征衍射峰无明显变化，这表明发芽时间的长短对淀粉的结晶区没有造成明显的影响，即发芽处理并未改变绿豆淀粉的结晶类型，这与 Liu 等^[23]的研究结果一致。虽然发芽绿豆淀粉的特征衍射峰无明显变化，但其特征衍射峰的强度却有所减弱，这意味着发芽后淀粉结晶性下降。

天然绿豆淀粉和不同萌发时间绿豆淀粉的相对结晶度如表 1 所示。未处理绿豆淀粉的相对结晶度为 39.64%，经过发芽处理后，绿豆淀粉的相对结晶度明显降低。绿豆淀粉经过 GABA 浸泡联合超声处理后相较于未处理绿豆淀粉结晶度下降，这是由于超声处理的空化作用可以使种皮的渗透性增强，同时 GABA 浸泡处理激活内源酶的活性，导致结晶度下降^[19]。在萌发过程中，淀粉被水解提供能量，

而淀粉的非结晶区先被水解，然后结晶区域再被水解^[24]。绿豆淀粉萌发 48 h 内，绿豆淀粉的非结晶区首先被水解，使相对结晶度有所增加，而萌发时间超过 48 h 之后，绿豆淀粉的结晶区也被逐渐水解，使结晶结构被破坏，分子链间的相互作用减弱，导致淀粉颗粒的结晶度降低，这与 Frost 等^[25]的研究结果一致。

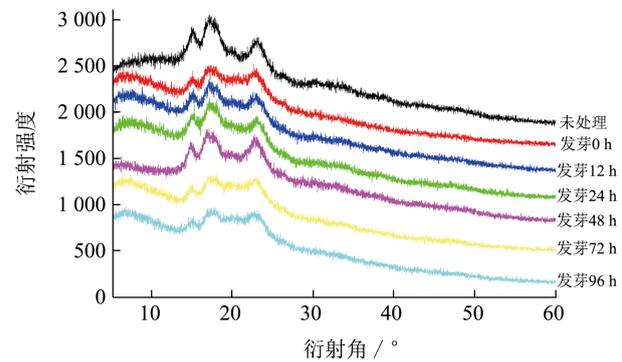


图 3 不同发芽时间绿豆淀粉的 XRD 谱图

Fig.3 XRD spectrum of mung bean starch with different germination time

表 1 不同发芽时间绿豆淀粉的相对结晶度

Table 1 Relative crystallinity of mung bean starch with different germination time

样品	未处理	0 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
结晶度/%	39.64 ± 0.29 ^a	23.03 ± 0.29 ^b	30.39 ± 0.37 ^d	33.36 ± 0.53 ^c	38.57 ± 0.31 ^b	19.56 ± 0.65 ^f	12.72 ± 0.21 ^e

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.4 傅里叶红外光谱分析

天然绿豆淀粉和不同萌发时间绿豆淀粉的 FT-IR 曲线如图 4 所示。绿豆淀粉在 1 423、1 157、1 039 和 931 cm^{-1} 处吸收带的吸收强度没有变化，不同发芽时间绿豆淀粉未出现红移。1 423、1 039 和 931 cm^{-1} 的吸收峰表明存在 C-O-H 拉伸振动，1 157 cm^{-1} 处 CH_2 相关峰表明 C-O 拉伸振动^[26]。峰强度变化可能归因于发芽期间结构部分损坏，由于淀粉结构不稳定，使键振动所需能量低。不同发芽时间绿豆淀粉的特征吸收峰无明显变化，所以发芽处理并没有使绿豆淀粉产生新的基团，这与刘裕^[27]的研究结果一致。

1 045 和 1 022 cm^{-1} 处吸收峰表明淀粉颗粒结晶区和非结晶区的数量，1 045 cm^{-1} /1 022 cm^{-1} 处峰强度比如表 2。随着发芽时间的延长，绿豆淀粉在 1 045 cm^{-1} /1 022 cm^{-1} 处峰强度比呈先上升再下降的趋势。1 045 cm^{-1} /1 022 cm^{-1} 峰强度比的下降可能是由于发芽的绿豆淀粉结晶区的双螺旋结构被破坏^[28]。随着发芽时间的增加，淀粉的有序度变化

不大，但在发芽 12 h 时和 48 h 之后，有序度有下降的趋势，这表明发芽处理会使淀粉的有序结晶结构遭到破坏，淀粉晶体结构由有序向无序转变^[9]。此外，1 045 cm^{-1} /1 022 cm^{-1} 峰强度比与 XRD 测量的结晶度变化略有差异，这可能是由于 FT-IR 透过力低，只能穿透淀粉颗粒表面，而不是整个淀粉颗粒，而 X 射线衍射可以穿透整个淀粉颗粒。

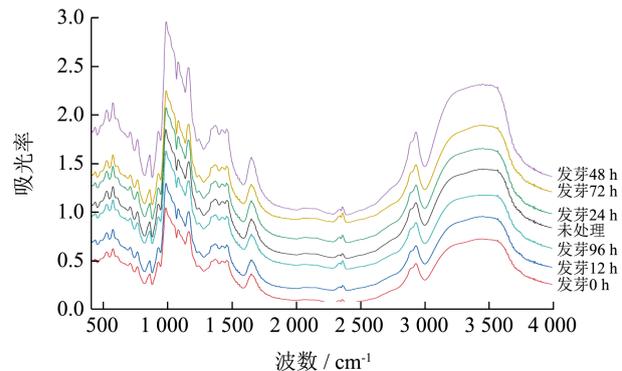


图 4 不同发芽时间绿豆淀粉的 FT-IR 曲线

Fig.4 FT-IR curve of mung bean starch with different germination time

表 2 不同发芽时间绿豆淀粉1 045 cm⁻¹/1 022 cm⁻¹有序度

Table 2 1 045 cm⁻¹/1 022 cm⁻¹ orderliness of mung bean starch at different germination times

样品	未处理	0 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
有序度	0.94	0.94	0.93	0.94	0.94	0.93	0.93

2.5 凝沉性分析

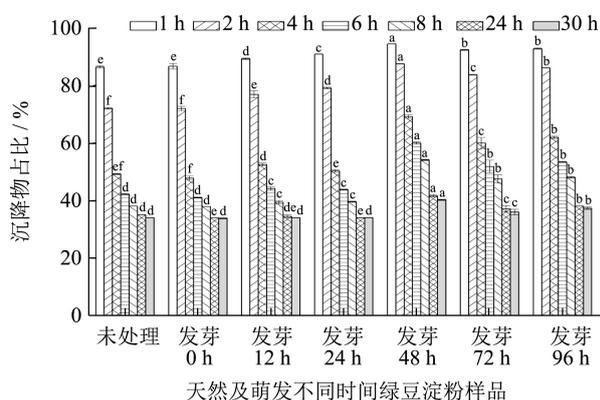


图 5 不同发芽时间绿豆淀粉的沉降物占比

Fig.5 Proportion of sedimentation of mung bean starch at different germination time

淀粉的凝沉性和老化特性有着密不可分的关系，直接反映了淀粉的老化程度。不同发芽时间绿豆淀粉的沉降物占比如图 5 所示。随着沉降时间的加长，沉降物的占比在逐渐下降，同时随着发芽时间的延长，淀粉沉降物占比有所增加，这与熊柳等^[29]的研究结果一致。支链淀粉分子具有支叉结构，凝沉性较差，而直链淀粉分子因具有线性结构，其凝沉性较强。随着发芽时间的延长，支链淀

粉分子被不断水解，造成支链淀粉分子所占比例下降，因此具有更强的凝沉性。朱彩玲等^[15]研究表明，凝沉性增强意味着发芽绿豆淀粉抗老化能力减弱，所以发芽后的绿豆淀粉会更容易老化回生。老化回生的淀粉抗消化能力较强，这为低 GI 的绿豆淀粉制品生产提供依据。

2.6 估计血糖生成指数

绿豆淀粉在不同萌发时间的估计血糖生成指数如表 3 所示。发芽绿豆淀粉的估计血糖生成指数呈先下降后上升的趋势，这可能是由于抗性淀粉在 12 h 含量达到最高，随着发芽时间的延长，抗性淀粉水解使估计血糖生成指数回升，这与何李晔紫^[30]的研究结果一致。淀粉消化率受淀粉颗粒大小、淀粉与脂质或淀粉与蛋白质相互作用、淀粉链长度、直链与支链淀粉比、淀粉与多酚相互作用等因素的影响，同时它还受到许多外界因素的影响，如储存时间、淀粉糊化、淀粉再生和消化酶活性^[31]。发芽刺激了内源性 α-淀粉酶活性，随着发芽时间的增加，非结晶区淀粉分子发生分解，抗性淀粉含量逐渐增加。发芽处理后消化率降低，这可能是由于发芽过程中淀粉分子结构的变化和冷却过程中淀粉老化所致^[32]。绿豆在萌发过程中富集了多种多酚类化合物，这些多酚类化合物可能与直链淀粉和支链淀粉相互作用形成短程有序结构^[33,34]。淀粉的化学结构、酚类化合物的浓度和类型以及食物的加工方式都会影响这些相互作用。酚类化合物在糊化过程中与淀粉形成 V 型淀粉包体化合物，导致淀粉消化率降低^[35]。

表 3 不同发芽时间绿豆淀粉的估计血糖生成指数

Table 3 Estimated glycemic index of mung bean starch at different germination time

样品	未处理	0 h	12 h	24 h	48 h	72 h	96 h
eGI 值	27.13 ± 0.58 ^a	26.12 ± 0.46 ^b	22.52 ± 0.61 ^f	23.96 ± 0.68 ^c	24.61 ± 0.69 ^d	24.65 ± 0.51 ^d	25.24 ± 0.15 ^e

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 (P<0.05)。

3 结论

本实验通过外源 GABA 联合超声处理绿豆种子萌发。通过对绿豆发芽过程的观察与检测，分析发芽对淀粉结构特性和血糖指标变化的影响。GABA 联合超声处理能增强淀粉水解酶活性，由于水解酶的作用使淀粉降解，因此绿豆发芽后总淀粉含量稳步降至 21.18%；发芽增加了绿豆直链淀粉和抗性淀粉的含量，抗性淀粉在 12 h 达到了 70.65%，随着萌发时间的延长，抗性淀粉不断被降解，绿豆淀粉的估计血糖生成指数也在缓慢的回升。根据扫描

电镜分析可知，发芽后绿豆淀粉颗粒无显著变化。根据 X-射线衍射分析和傅里叶红外光谱分析可知，发芽绿豆淀粉为典型的 A 型结构，发芽后绿豆淀粉颗粒的结晶类型并没有改变，相对结晶度由 39.64% 下降到 96 h 的 12.72%，但随着发芽时间的延长，在淀粉水解酶的作用下，绿豆淀粉的晶体结构受到了一定的破坏。发芽处理绿豆淀粉没有新的特征吸收峰出现，因此没有产生新的基团，但淀粉晶体结构的有序性降低，这使淀粉晶体结构由有序向无序转变。随着发芽绿豆淀粉的凝沉性增强，其抗消化能力也有所增加，在发芽 12 h 时绿豆淀粉的估计血

糖生成指数也降到了 22.52,起到了减缓血糖升高的作用。发芽绿豆淀粉在生产需要低粘度材料的食品(蛋糕、饼干)方面具有潜在的应用价值,本研究有助于从发芽绿豆中分离出合适的淀粉应用于食品工业,为其在功能食品中的应用提供了理论依据。

参考文献

- [1] 曾志红,王强,林伟静,等.绿豆的品质特性及加工利用研究概况[J].作物杂志,2011,4:16-19.
- [2] WEI Y, WANG X, SHAO X, et al. Sucrose treatment of mung bean seeds results in increased vitamin C, total phenolics, and antioxidant activity in mung bean sprouts [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(12): 4037-4044.
- [3] 周素梅,李若凝,唐健,等.绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J].粮油食品科技,2022,30(2):16-23.
- [4] MOHAMMADIAN M, SALAMI M, MOGHADAM M, et al. Mung bean protein as a promising biopolymeric vehicle for loading of curcumin: Structural characterization, antioxidant properties, and *in vitro* release kinetics [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2021, 61: 102148.
- [5] 王倩.发芽对不同直链淀粉含量玉米淀粉理化性质的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2022.
- [6] REN T, ZHENG P, ZHANG K, et al. Effects of GABA on the polyphenol accumulation and antioxidant activities in tea plants (*Camellia sinensis* L.) under heat-stress conditions [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 159: 363-371.
- [7] 周玥彤,付欣,于淼,等.超声波诱导对花生芽理化指标的影响[J].食品研究与开发,2021,42(22):23-29.
- [8] LÓPEZ-RIBERA I, VICIENT C M. Use of ultrasonication to increase germination rates of Arabidopsis seeds [J]. Plant methods, 2017, 13(1): 31.
- [9] 邢宝.发芽处理对藜麦淀粉结构和理化性质的影响[D].北京:中国农业科学院,2021.
- [10] GB 5009.9-2016,食品安全国家标准食品中淀粉的测定[S].
- [11] 高菲,李欣,刘紫薇,等.4种高粱淀粉理化性质的比较分析[J].中国粮油学报,2023,38(1):71-79.
- [12] 张晓萌,陈金凤,李建刚,等.超高压处理对“和尚头”小麦淀粉结构和特性的影响[J/OL].食品与发酵工业:1-9 [2023-06-07].
- [13] MARZEC A, SZADKOWSKI B, ROGOWSKI J, et al. Novel eco-friendly hybrid pigment with improved stability as a multifunctional additive for elastomer composites with reduced flammability and pH sensing properties [J]. Dyes and Pigments, 2021, 186: 108965.
- [14] 王谊.油炸过程中不同晶型淀粉的结构变化与吸油特性研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [15] 朱彩玲,曹余,李艳民,等.不同原料淀粉的糊液特性研究[J].农产品加工,2020,12:7-9,13.
- [16] 韩玲玉.多谷物共挤压加工对其物化及消化特性影响研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [17] OLIVEIRA M E A S, COIMBRA P P S, GALDEANO M C, et al. How does germinated rice impact starch structure, products and nutritional evidences?-A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 122: 13-23.
- [18] CHINMA C E, ABU J O, AFOLABI F H, et al. Structure, *in vitro* starch digestibility and physicochemical properties of starch isolated from germinated Bambara groundnut [J]. J Food Sci Technol, 2023, 60(1): 190-199.
- [19] CHEN Y P, LIU Q, YUE X Z, et al. Ultrasonic vibration seeds showed improved resistance to cadmium and lead in wheat seedling [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2013, 20(7): 4807-4816.
- [20] XING B, TENG C, SUN M, et al. Effect of germination treatment on the structural and physicochemical properties of quinoa starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106604.
- [21] PAL P, KAUR P, SINGH N, et al. Morphological, thermal, and rheological properties of starch from brown rice and germinated brown rice from different cultivars [J]. Starch-Stärke, 2023, 75(3-4): 2100266.
- [22] GUANTIAN L, FAN Z. Molecular structure of quinoa starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 158: 124-132.
- [23] LIU Y, SU C, SALEH A, et al. Effect of germination duration on structural and physicochemical properties of mung bean starch [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 154: 706-713.
- [24] LI C Y, LI C, LU Z X, et al. Morphological changes of starch granules during grain filling and seed germination in wheat [J]. Starch-Stärke, 2012, 64(2): 166-170.
- [25] FROST K, KAMINSKI D, KIRWAN G, et al. Crystallinity and structure of starch using wide angle X-ray scattering [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(3): 543-548.
- [26] CAEL J J, ISAAC D H, BLACKWELL J, et al. Polarized infrared spectra of crystalline glycosaminoglycans [J]. Carbohydrate Research, 1976, 50(2): 169-179.
- [27] 刘裕.发芽绿豆和青稞宏量组分结构、理化性质及对面条品质的分析[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- [28] ELESSANDRA D R Z, ALVARO R G D. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 83(2): 317-328.
- [29] 熊柳,孙玲玲,孙庆杰.发芽绿豆淀粉性质及对粉丝品质影响的研究[J].粮油食品科技,2010,18(3):29-32.
- [30] 何李晔紫.发芽对糙糯米粉及其淀粉物化性质的影响[D].合肥:安徽农业大学,2020.

- [31] LU X, CHANG R, LU H, et al. Effect of amino acids composing rice protein on rice starch digestibility [J]. Food Science & Technology, 2021, 146: 111417.
- [32] MA Z, GUAN X, GONG B, et al. Chemical components and chain-length distributions affecting quinoa starch digestibility and gel viscoelasticity after germination treatment [J]. Food & Function, 2021, 12(9): 4060-4071.
- [33] LI M, PERNELL C, FERRUZZI M G. Complexation with phenolic acids affect rheological properties and digestibility of potato starch and maize amylopectin [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 843-852.
- [34] HAN X, ZHANG M, ZHANG R, et al. Physicochemical interactions between rice starch and different polyphenols and structural characterization of their complexes [J]. LWT, 2020, 125: 109227.
- [35] MARIO G F, BRUCE R H, NICOLAS B. Phenolic compounds are less degraded in presence of starch than in presence of proteins through processing in model porridges [J]. Food Chemistry, 2020, 309(30): 125769.