

# 发芽对杂粮营养品质及功能特性改善的研究进展

王欣卉<sup>1</sup>, 宋雪健<sup>1,2</sup>, 张东杰<sup>1,2\*</sup>, 李志江<sup>1,2\*</sup>, 李志明<sup>1</sup>, 邵振甲<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319)

(2. 黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319)

**摘要:** 杂粮种子的发芽过程涉及多种复杂的物质转化, 具有独特的生理效应, 一些营养成分、功能因子的含量会在多种复合酶的作用下逐渐提升, 而抗营养因子含量会逐渐降低。因此对杂粮进行发芽处理的研究引起了广泛关注。该研究对利用微波、超声、高压脉冲电场等诱导杂粮发芽技术进行分析, 重点综述了发芽绿豆、黑豆、红小豆、荞麦、粟等杂粮谷物, 总结其发芽前后多酚、黄酮、 $\gamma$ -氨基丁酸、蛋白质等营养成分及植酸、单宁等抗营养因子的变化趋势, 并综述发芽杂粮对糖尿病、高血脂、高血压、抗氧化活性及抗炎活性的功能效果。发芽后的杂粮种子作为主/辅料在开发相关功能性食品方面也取得了一定的研究成果, 但相关的活性成分变化机理及对食品加工有何影响还有待进一步研究。因此, 杂粮经过适当的发芽后, 其生理活性成分朝着有益的方向变化, 有望成为发芽食品功能性膳食补充剂, 赋予其多种健康益处和药用价值。

**关键词:** 杂粮; 发芽; 功能活性; 营养品质

文章编号: 1673-9078(2023)12-45-52

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.12.0591

## Research Advances on Improvements in Nutritional Quality and Functional Properties of Multigrains by Germination

WANG Xinhui<sup>1</sup>, SONG Xuejian<sup>1,2</sup>, ZHANG Dongjie<sup>1,2\*</sup>, LI Zhijiang<sup>1,2\*</sup>, LI Zhiming<sup>1</sup>, TAI Zhenjia<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2. Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals Processing and Quality Safety, National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

**Abstract:** The germination stage of coarse grain seeds involves a variety of complex biochemical transformations that have unique physiological effects. The contents of some nutrients and functional factors will gradually increase under the action of multiple complex enzymes, whereas the content of antinutritional factors will gradually decrease. Therefore, the physiological benefits of germinating multigrains have attracted extensive attention. The techniques of inducing the germination of multigrains by microwave, ultrasound, and high-voltage pulsed electric field were reviewed. This paper focused on germinated mung beans, black beans, red beans, buckwheat, millet, and other cereals. Trends in changes of polyphenols, flavonoids, GABA, proteins, and other nutrients after germination, such as phytic acid, tannins, and other antinutritional factors were reviewed. The functional effects of germinated multigrains on diabetes, hypertriglyceridemia, hypertension, antioxidant activity, and anti-inflammatory activity were analyzed. As a main or auxiliary ingredient, germinated grain seeds have had a

引文格式:

王欣卉, 宋雪健, 张东杰, 等. 发芽对杂粮营养品质及功能特性改善的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 45-52

WANG Xinhui, SONG Xuejian, ZHANG Dongjie, et al. Research advances on improvements in nutritional quality and functional properties of multigrains by germination [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 45-52

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 黑龙江省自然科学基金研究团队项目 (TD2020C003); 黑龙江省头雁团队项目 (黑政规[2019]2号); 国家重点研发计划项目 (2018YFE0206300); 黑龙江省杂粮产业技术协同创新体系杂粮食品加工技术协同创新岗、优势特色学科资助项目 (黑教联[2018]4号); 黑龙江八一农垦大学“三纵三横”科研团队支撑计划 (TDJH201806)

作者简介: 王欣卉 (1992-), 女, 在读博士, 研究方向: 食品科学, E-mail: w604466213@163.com; 共同第一作者: 宋雪健 (1991-), 男, 硕士, 实验师, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: byndsxj@126.com

通讯作者: 张东杰 (1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: byndzdj@126.com; 共同通讯作者: 李志江 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: lizhijiang@126.com

substantial impact on the development of related functional foods. However, the mechanisms of the active ingredients and their impact on food processing need to be studied further. Therefore, after proper germination, the physiologically-active ingredients of multigrains have the potential to become functional dietary supplements of medicinal value with multiple health benefits.

**Key words:** miscellaneous grains; germination; functional activity; nutritional quality.

杂粮营养成分丰富,但其口感粗糙、适口性差,不同杂粮中的单宁、植物凝集素、胰蛋白酶抑制剂、皂苷、植酸等抗营养因子,会阻碍机体对营养成分的消化吸收,因此限制了其杂粮的发展应用<sup>[1]</sup>。采用发芽、发酵、挤压、膨化等方式处理杂粮,可以改善杂粮适口性、不易消化等不足,降低抗营养因子水平,提升功能活性<sup>[2]</sup>。发芽是一种自然现象,也是一种传统的食物做法,因发芽的工艺简单、性价比高等特点被广泛应用于日常饮食及科学研究。杂粮种子发芽过程中,抗营养因子水平降低,生物活性化合物的浓度和可用性升高,比未发芽的杂粮种子具有更好的生物活性<sup>[3]</sup>。发芽过程可以减少植酸、单宁、寡糖、胰蛋白酶抑制剂等抗营养因子,提高维生素的生物利用率, $\gamma$ -氨基丁酸和总酚含量,以及抗氧化活性和其他微量营养素,从而为人类提供健康益处。

本文论述了发芽生物技术工艺对杂粮营养品质和功能特性的影响,特别关注了发芽杂粮食品的研究开发,旨在为开发杂粮的应用潜力,拓宽发芽杂粮相关技术研发、产业化应用提供参考。

## 1 杂粮发芽诱导技术

杂粮种子发芽可分为吸水膨胀、萌发和出苗三个阶段。吸水膨胀是第一阶段,干燥的种子对水分进行吸收和 mRNA 进行生物合成。萌发是第二阶段,种子的所有新陈代谢和生理活性被重新激活,这一萌动时期,是最有活力阶段,这一阶段受到种子激素和外部条件影响。出苗是第三阶段,种子续吸水和胚轴发育产生胚根<sup>[4]</sup>。杂粮种子发芽过程受到休眠期、老化或退化等内因影响,同时也对温度、时间、可见光、外源激素及外源物理场等外因极为敏感,通过对敏感因素的调控可有效地提高种子发芽的综合指标<sup>[5]</sup>。传统的发芽方法是在适宜的温度下,采用洒水的方式来提供水源,使其萌发。现在可通过借助科技方法来实现提升种子的萌发速率和发芽率,对营养组分进行调控,抑制有害微生物的滋生。

### 1.1 微波诱导发芽技术

微波诱导萌发技术,因其操作简单、安全,其可在诱导种子在萌发时出现生物性质的非热效应,改变细胞膜的电位差,促进可溶性物质穿过细胞膜,使杂

粮种子的大分子结构发生改变,提升种子萌发所需酶的活化能,促进种子萌发和新陈代谢<sup>[6]</sup>。微波辐照后的蚕豆、芸豆等杂粮种子的萌发效果更好<sup>[7,8]</sup>。Ibrahim 等<sup>[9]</sup>研究发现,微波辐射绿豆 15 s,红小豆 30 s,其发芽指数达到最大值。Wang 等<sup>[10]</sup>利用 600 W 的微波对荞麦预处理 10 s 后,在发芽 7 d 最终发芽率最高,是对照组的 2 倍,且有利于总黄酮的富集。王顺民等<sup>[11]</sup>利用微波处理诱导豌豆发芽发现,单位时间内随着微波功率的增加(100、200、300 W)豌豆的发芽率逐渐降低,相同功率下随着处理时间的延长(10 s、30 s)发芽率也逐渐降低。采用微波技术可以短时间内完成对杂粮种子的萌发诱导,但长时间、大功率处理,会影响种子内部酶的空间结构,导致钝化<sup>[12]</sup>。因此,适当的微波(短时间、低功率)处理杂粮可提高酶的生物活性,对种子萌发有着重要的生物学意义。

### 1.2 超声波诱导发芽技术

超声波是一种机械波,以其操作简单、高效、环保的特点,在种子萌发中得到应用<sup>[13]</sup>。超声波振动可以通过改变种子细胞膜的通透性及超微结构,促进酶活性激发,加快新陈代谢速率,最终加速种子萌发过程。超声波促进杂粮种子芽的生长和产量的提高,可能与萌发过程中  $\alpha$ -淀粉酶活性增强有关<sup>[14]</sup>。闫延鹏等<sup>[15]</sup>利用 48 kHz、10 Vpp 的超声条件对绿豆进行预处理 35 min,绿豆发芽率达到最高。Chiu 等<sup>[16]</sup>在 25 °C、40 kHz 的超声条件下,对豌豆种子处理 1 min,结果表明,豌豆的发芽率从 85%增加至 98.1%,并且萌发的菌落总数也大幅度降低。超声的强度、频率及时间对杂粮种子的发芽有一定的影响,具体的影响强度还需要进一步探索。

### 1.3 高压脉冲电场发芽技术

高压脉冲电场是一种非热态加工技术,通过脉冲电场内的粒子束和电子辐射作用,使种子细胞发生生理变化,产生大量的偶极子可加快种子对水分的吸收,并且高压脉冲电场会影响种子内蛋白质、脂肪等生物大分子的定向排列,提高酶的生物活性,加快新陈代谢,从而促进种子萌发。武翠卿等<sup>[17]</sup>采用脉冲电场强度为 1.0 kV 脉冲个数为 50,脉冲时间为 50  $\mu$ s 的工艺条件,对高粱种子萌发取得了很好的效果,在第 3 天,

发芽率为100%。陈建中等<sup>[18]</sup>利用电场强度为340 kV/m, 处理时间为14 min 处理粟, 结果表明粟种子在萌发期内吡啶乙酸、玉米素核苷和赤霉素, 脱落酸含量降低, 显著提升了粟的萌发活力。因此, 电场强度、脉冲个数和处理时间的不同, 对杂粮种子发芽的促进、抑制或无应答变现处不同的响应机制。总之, 高压脉冲电场诱导发芽技术是一种新兴的、具有潜力的植物萌发技术, 可以有效提高种子萌发率和营养价值, 同时符合生态环保的要求。

#### 1.4 其他诱导发芽技术

低温等离子体发芽技术可以使杂粮种子细胞内酶的活性增加, 打破种子休眠, 加快生理代谢反应, 还可以改变种子内部结构, 加大细胞膜通透性, 提升亲水效果, 提高发芽率。Sadhu 等<sup>[19]</sup>研究发现低温等离子体技术可显著将绿豆种子的发芽率提高至36.2%。

脉冲强光诱导发芽技术具有成本高效、稳定、高效的特点<sup>[20]</sup>, 但在诱发杂粮种子发芽领域鲜有报道。袁典等<sup>[21]</sup>采用不同浓度的NaCl处理绿豆种子也能提升绿豆的发芽效果。但盐浓度过高也会限制种子的萌发<sup>[22]</sup>。

## 2 发芽杂粮种子中的活性物质及其功能性评价

### 2.1 发芽绿豆

绿豆又叫青小豆, 是传统的药食同源性杂粮豆类, 《本草纲目》一书中表明绿豆具有清热解毒、解暑、抗过敏的作用。绿豆中含有25%~28%的蛋白质, 50%左右的淀粉及少量生物活性物质(生物碱、香豆素、植物甾醇、皂甙等)<sup>[23]</sup>。绿豆在萌发过程中会积累各种多酚类化合物, 绿豆芽作为酚类化合物、蛋白肽等生物活性的优良食物来源, 在全球范围内被广泛消费<sup>[24]</sup>。

赵天瑶等<sup>[25]</sup>对绿豆(白绿8号)发芽36 h, 其蛋白质含量达到最大值, 随后开始减低, 而蛋白酶活性在72 h 达到最大值, 球蛋白的含量随着萌发时间的延长先上升后下降, 并且球蛋白水解的小分子肽(18~25 ku)的亚基条带, 在24~60 h 时有所增加。萌发48 h 的绿豆蛋白对超氧阴离子自由基的清除能力比未萌发的提升了81.7%。Yu 等<sup>[26]</sup>根据生物信息学对绿豆芽进行分析, 得出2364个肽, 其中76个具有生物活性, 绿豆芽中肽的种类和浓度均高于种子, 推断绿豆芽中生物活性肽含量更高。Kartikayan 等<sup>[27]</sup>研究发现采用6 h 浸润和24 h 萌发的绿豆种子, 其糖基化蛋白质的含量达到最大, 该技术可为人类提供饮食中不同氨基酸、蛋白质、糖基化蛋白和其他生物活性代谢物等潜在营养来源。靳晓琳等<sup>[28]</sup>采用钙离子浓度为2 mmol/L

的CaCl<sub>2</sub>对绿豆(豫绿2号)进行发芽处理, 每1 h 喷淋一次, 每次2 min, 结果发现, 随着发芽时间的延长(1~4 d), 绿豆中总酚、总黄酮、花青素、抗坏血酸等成分显著提升, 进而抗氧化能力增强。绿豆在萌发时有些活性物质也会逐渐降低, 如牡荆素和异牡荆素的含量<sup>[29]</sup>。因此, 通过对绿豆种子进行浸泡预处理后再结合相应的外源辅助萌发技术, 可以有选择性的提升绿豆的抗氧化活性、食用价值及应用潜力, 对基于绿豆萌发的原理还需要不断地进行探索。

绿豆萌发后, 其中的抗营养因子含量会有所下降, 且绿豆中的蛋白质、维生素和矿物质等多种营养素会得到增加和优化, 从而提高了绿豆的营养品质和利用价值。因此, 绿豆萌发是一种非常健康的食品加工方式, 也是一种方便简单却富含营养的清涼食品。

### 2.2 发芽黑豆

黑豆中蛋白质含量极为丰富约为36%, 具有补肾、利尿消肿、降低胆固醇、抗氧化、抗癌等功效。黑豆芽是最早的萌发食品, 发芽可使黑豆的矿物质、膳食纤维和体外养分增加, 抗营养因子含量减少<sup>[30]</sup>。刘宏瑀等<sup>[31]</sup>利用不同品种的小粒黑豆浸泡3 h 后, 在23~28 °C 条件下发芽, 随着发芽时间的延长总酚含量逐渐增加, 总黄酮和花色苷含量在发芽第3天达到最大值, 其中子洲小黑豆芽对DPPH、超氧阴离子自由基清除能力优于其他品种。Apiraksakorn<sup>[32]</sup>黑豆经过萌发后γ-氨基丁酸含量增加到最大值4.78 mg/g, 远远大于绿豆和红豆。Huang 等<sup>[33]</sup>研究发现, 用硒处理黑豆发芽后, 虽然硒元素、γ-氨基丁酸、总黄酮含量显著增加, 但可溶性蛋白、还原糖、脂肪含量有所下降。黑豆芽的提取物可显著抑制了脂多糖诱导巨噬细胞炎症标志物的表达<sup>[34]</sup>。来吉祥<sup>[35]</sup>发现0~10 cm 的黑豆芽提取液(40 mg/mL)对酪氨酸酶的抑制率可达90%左右。因此, 黑豆的品种、萌发条件及水解方式对活性成分的获取有一定的影响。黑豆萌芽中抗氧化活性的基因表达及机理有待进一步研究。

总之, 黑豆发芽的原理类似于其他豆类的发芽过程, 其关键在于水分和营养物质的供应以及代谢酶类的激活, 这些因素共同作用使得胚芽能够快速生长伸长并最终形成嫩绿色的豆芽。同时, 经过发芽的黑豆含有更多的营养素, 更易消化吸收, 具有很高的营养价值和食用价值。

### 2.3 发芽红小豆

红小豆中富含蛋白质、维生素、皂甙类物质以等生物活性物质, 红小豆在发芽时的浸种温度为35~

45 ℃, 豆芽最适宜的生长温度是 25~35 ℃<sup>[36]</sup>, 具有健脾养胃、利水除湿、清热解毒、通乳汁和补血的功能。唐琦等<sup>[37]</sup>发现红小豆中的总多酚、总黄酮含量随着萌发时间的延长(1~4 d)呈先降低后升高趋势, OH·清除能力显著提高。Samaila 等<sup>[38]</sup>研究发现发芽可使红小豆的总酚含量显著增加( $P<0.05$ ), 单宁和黄酮含量均显著降低( $P<0.05$ ), 发芽第 3 d 其抗氧化能力提高了 52.84%。Jiang 等<sup>[39]</sup>发现红小豆中  $\gamma$ -氨基丁酸会随着种子发芽而产生富集, 富含不同浓度的  $\gamma$ -氨基丁酸的红豆芽对患有 2 型糖尿病小鼠有一定的治疗作用, 可能富含  $\gamma$ -氨基丁酸的红豆芽对改善色氨酸代谢、甘油磷脂代谢、鞘氨醇代谢以及甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢途径有关。目前, 对红小豆发芽肽的分离及功效研究还鲜有报道。

红小豆萌发可显著提高其营养品质, 增强人体对其营养成分的吸收利用率, 同时降低其中的抗营养因子含量, 使其成为更加健康的食材。

## 2.4 发芽荞麦

荞麦可分为苦荞和甜荞两类, 含有多种酚类物质, 如芦丁和槲皮素等<sup>[40]</sup>, 具有抗癌、抗氧化、抗菌消炎的药理作用。孙国娟等<sup>[41]</sup>对不同品种荞麦芽的功能性进行了评价发现, 在发芽第 14 天时, 荞麦芽提取物具有很强的抗氧化活性, 对 DPPH 自由基的清除能力达到最高, 并且苦荞麦芽要强于甜荞麦芽。Thakur 等<sup>[42]</sup>发现通过浸泡后再萌发的荞麦其抗氧化活性物质显著提升, 而抗营养因子如单宁、植酸等分别下降了 59.91%和 17.42%。Lin 等<sup>[43]</sup>发现甜荞麦芽在发芽第 8 天时, 总酚、槲皮素、抗坏血酸和  $\gamma$ -氨基丁酸等各种功能性成分含量较高, 并且能有效地降低仓鼠体内的血胆固醇和甘油三酯。凌阿静<sup>[44]</sup>发现 5  $\mu\text{g/mL}$  的荞麦芽乙醇提取物对过氧化氢诱导的 HepG2 细胞氧化损伤具有保护作用。Bae 等<sup>[45]</sup>发现发芽 5 d 的荞麦总酚含量、总黄酮含量和铁离子还原能力显著高于未发芽荞麦( $P<0.05$ ), 并且对脂肪积累的相关基因有一定的抑制作用, 可以组织脂肪细胞的分化。苯丙氨酸解氨酶和黄酮醇合成酶是促进苦荞萌发和黄酮积累的关键酶<sup>[46]</sup>。因此, 萌发后的荞麦可以作为一种功能物质被应用。萌发后的荞麦其蛋白酶抑制剂含量降低, 提升荞麦的消化吸收率, 但其作用机理有待进一步研究。

综上所述, 荞麦萌发后, 其营养价值会进一步提高, 其中淀粉质部分转化为可溶性糖类, 膳食纤维和某些营养成分含量也会有所改变, 从而使得荞麦更易被人体吸收利用, 并且具有促进健康的功效。

## 2.5 发芽小米

粟中富含蛋白质、碳水化合物、多酚、黄酮、低聚糖等生物活性成分, 粟可作为一种优质蛋白质和氨基酸的来源, 含有 7.78%~10.22%的总氨基酸, 3.08%~4.21%的必需氨基酸, 氨基酸比例满足联合国粮农组织推荐的比例, 并且粟对糖尿病、心血管疾病、高血压等疾病有一定辅疗作用<sup>[47]</sup>。粟发芽可使游离氨基酸的显著增加, 并对粟中多酚成分、矿物质和  $\gamma$ -氨基丁酸的应用价值产生了显著的有益影响<sup>[48]</sup>。李朋亮等<sup>[49]</sup>利用豫谷 18 和汾特 5 号 2 个粟品种, 在 25 ℃的条件下发芽 24 h, 对挥发性成分进行分析得出, 醇类和酯类在发芽后含量降低, 醛类和酮类含量增加。Navyashree 等<sup>[50]</sup>利用龙爪粟在 27~33 ℃的条件下发芽 48 h 发现, 粟的蛋白质、钙、镁元素和抗氧化活性显著提高, 而总灰分、碳水化合物和脂肪明显降低。Sharma 等<sup>[51]</sup>先用 0.05%次氯酸钠对粟进行消毒处理, 浸泡 12 h, 23~27 ℃的条件下发芽 48 h 发现, 发芽后的粟中单宁为 40.31 mg/100 g, 植酸为 4.65 mg/g, 而未发芽的粟为 73.41 mg/100 g, 植酸为 8.77 mg/g。因此, 发芽有利降低粟中抗营养因子成分。在粟萌发时通过浸泡可以使植酸和单宁暴露, 而在萌发过程中, 随着植酸酶的激活会将植酸-磷复合体降解为肌醇单磷酸, 从而降低植酸含量<sup>[52]</sup>。研究发现多酚可通过酯键、醚键等化学键与粟细胞壁中的非淀粉多糖进行特异性结合, 粟在萌发期间细胞壁在细胞壁酶的作用下发生水解释放多酚, 导致含量上升<sup>[53]</sup>。Wang 等<sup>[54]</sup>研究发现, 发芽可使粟多酚含量增加, 并且对糖尿病一定的治疗作用。多酚是通过激活磷酸腺苷来进一步活化蛋白激酶途径来治疗糖尿病<sup>[55]</sup>。采用多种处理相结合的方式可进一步提升粟的生物活性, 降低抗营养因子, 将发芽后的粟进行发酵处理后得到的产物具有一定的抗炎活性可预防一些肠道疾病的发生<sup>[56]</sup>。

粟萌发过程中蛋白质、淀粉和膳食纤维等营养成分会有所变化, 其中蛋白质含量略微降低, 亚油酸、可溶性糖和总糖含量增加, 膳食纤维含量略微下降, 但可溶性膳食纤维含量增加。萌发处理还能改善粟中的矿物质和维生素 B 族含量, 从而提高了其营养价值和健康功效。

## 2.6 其他发芽杂粮种子

将鹰嘴豆置于 0.1%次氯酸钠中进行消毒处理, 用去离子水中浸泡 24 h, 在相对湿度为 80%, 温度为 30 ℃的条件下发芽, 结果表明, 分离蛋白的产量随着萌发时间的增加而降低( $P<0.05$ ), 而可溶性蛋白浓

度则随着萌发时间 ( $P < 0.05$ ) 的增加而增加,用木瓜蛋白酶、无花果蛋白酶水解发芽的鹰嘴豆分离蛋白所获得的肽具有治疗 2 型糖尿病的效果。随着萌发时间的延长蛋白酶活性增加,蛋白质的化学组成和等电点受到影响,降低鹰嘴豆蛋白质的整体疏水性<sup>[57]</sup>。He 等<sup>[58]</sup>发现通过发芽诱导,可显著增加藜麦中蛋白质、还原糖、游离氨基酸、维生素和植物化学物质的含量,其中,发芽 6 d 的藜麦 ADCS 基因表达量上调了 28.31 倍,对于叶酸的合成起到了一定的促进作用,同时还发现,不同的藜麦品种之间发芽后各个物质含量间存在一定的差异性。刘婷婷等<sup>[59]</sup>对比了不同品种的芸豆在发芽后功能性物质的含量,结果表明,在发芽 4~5 d 时出现红芸豆酚类物质含量最高,而发芽对于紫花芸豆的酚类物质无显著影响。姜秀杰等<sup>[60]</sup>对豌豆进行浸泡 8 h,真空 5 h 处理后,在 30 °C 的条件下发芽,豌豆  $\gamma$ -氨基丁酸含量高达 189.73 mg/100 g,要比未真空处理而是正常发芽的高出 92.30 mg/100 g。

### 3 发芽杂粮食品开发

种子发芽是生长过程中最活跃的阶段,通过发芽不仅将种子中的大分子物质转化为更容易被吸收的小分子物质,还激发强大生物活性和营养价值,提升蛋白质的消化率,减少抗营养因子,还可以克服不易于加工和适口性差等问题<sup>[61,62]</sup>。因此,可以利用发芽的食用种子进行各种食品的加工,赋予产品所需的营养和功能特性。

#### 3.1 固态类食品

Polat 等<sup>[63]</sup>在温度为 20 °C,相对湿度为 80%~90% 的条件下对小扁豆发芽 5 d,利用超声辅助工艺(超声波功率为 20 W,固/溶剂比为 1:10 (g/mL),水为溶剂,提取时间为 18 min)获取小扁豆芽溶液提取物,并将其添加到饼干中发现,添加小扁豆提取物的饼干,其总蛋白含量增加了 0.75%、总酚含量增加了 2.55 mg/g 和氨基酸含量增加了 0.50  $\mu$ mol/mg,同时饼干的硬度和色泽均有所改善。Mandeep 等<sup>[64]</sup>将 15.13 g/100 g 的发芽菜豆和 34.50 g/100 g 发芽鹰嘴豆粉加入到小黑麦中制备曲奇饼干,质地柔软,颜色可接受,营养丰富,蛋白质和碳水化合物的消化率得到改善,赖氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸、色氨酸均高于全麦粉饼干,并且储藏期长达 90 d。Xing 等<sup>[65]</sup>将白藜麦(中力 1 号)利用 3% 的次氯酸钠进行消毒,在温度为 25 °C,相对湿度为 95% 下进行发芽研究,结果表明添加发芽藜麦粉可以提高意大利面的体外淀粉消化率,在小麦粉中添加 20% 的藜麦芽(发芽 24 h)配方,以开发消化率提高、

烹饪、质地和感官质量变化可接受的小麦/发芽藜麦面食。同时,发芽绿豆粉代替小麦粉制作面包<sup>[66]</sup>,萌芽鹰嘴豆粉和高粱制备米糕<sup>[67]</sup>,发芽苦荞花生复合营养粉等产品均已被研发生产<sup>[68]</sup>。

#### 3.2 液态类食品

对于发芽种子制备液态食品的研究,多集中在以发芽糙米为主要研究对象,而对杂粮种子发芽液态食品的研发相对较少<sup>[69]</sup>。Ujiroghene 等<sup>[70]</sup>将藜麦在 25 °C 的条件下,发芽 48 h 后粉碎,作为辅料制备酸奶,结果表明,发芽藜麦制备的酸奶可以作为补充某些营养的功能性饮食,对糖尿病患者也有一定的帮助。邓春丽等<sup>[71]</sup>以发芽 48 h 的乌皮青仁黑豆为主要原料,并添加体积分数为 25% 的牛奶、8% 的白砂糖和 0.06% 的柠檬酸,制备发芽黑豆乳,具有奶香协调,口感细腻,无豆腥味的特点。发芽燕麦粉被用作生产新型发酵饮料,具有良好的理化、营养和感官特性,并且能有效地降低血清中总胆固醇和甘油三酯<sup>[72]</sup>。发芽的红芸豆与水按照 1:8 的质量混合,通过添加 5% 的糖,在 80 °C 的恒温条件下加热 45 min,得到发芽的红芸豆乳,结果发现发芽 20 h 的红芸豆乳口感偏好 ( $P < 0.05$ ),并且发芽时间越长,乳制品的甜度越大。主要是红芸豆在发芽过程中可以将皂苷等苦味物质转换为糖。发芽红芸豆乳中酚类物质含量为 583.85 mg/L,对大鼠有一定的抗炎作用<sup>[73]</sup>。

### 4 结论

发芽技术对杂粮理化性质的改善及杂粮食品研发中得到广泛应用。发芽与发酵、膨化、烘焙等技术相比较,具有操作简单方便,可提高杂粮的消化率、食用性、生物活性及抗氧化力的优良技术。发芽是植物生长中新陈代谢等机体反应最活跃的阶段,发芽可以将一些不利于被人体吸收的大分子化合物转化为小分子化合物,还能降低抗营养因子的含量,提高杂粮的消化吸收率。非热加工新技术是打破杂粮种子休眠,改善杂粮种子发芽,提高杂粮发芽特性的有效技术。超声、高压脉冲电场、微波等发芽诱导技术在提高杂粮种子发芽率、发芽势的同时,减少了化学促发芽剂的使用,有效地降低了对环境及食品本身的污染。发芽的红小豆、绿豆、黑豆、燕麦等杂粮中,蛋白质、多酚、黄酮、氨基酸、 $\gamma$ -氨基丁酸等营养物质的含量得到了有效提升,胰蛋白酶抑制剂、植酸、单宁等抗营养因子含量明显降低。发芽的杂粮种子具有一定的抗氧化活性,可有效地清除多种自由基,对糖尿病、高血压、高血脂等并发症有一定的辅疗效果。利用发

芽的杂粮来开发新型的膳食食品,不仅在口感、营养上得到了改善,同时还被赋予了膳食食品一定的功效,提升了膳食多元食品的功能性,丰富了食品的种类。

### 参考文献

- [1] 王岸娜,王艺洁,吴立根,等.杂粮的活性成分与杂粮加工研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2022,43(2):117-125.
- [2] Nkhata S G, Ayua E, Kamau E H, et al. Fermentation and germination improve nutritional value of cereals and legumes through activation of endogenous enzymes [J]. Food Sci Nutr., 2018, 6(8): 2446-2458.
- [3] Kajihansa O E, Fasasi R A, Atolagbe Y M. Effect of different soaking time and boiling on the proximate composition and functional properties of sprouted sesame seed flour [J]. Nigerian Food Journal, 2014, 32(2): 8-15.
- [4] Li Q F, Zhou Y, Xiong M, et al. Gibberellin recovers seed germination in rice with impaired brassinosteroid signalling [J]. Plant Science, 2020, 293: 110435.
- [5] Qiang X, Hong T B, Yi B, et al. Characterizing physicochemical, nutritional and quality attributes of wholegrain *Oryza sativa* L. subjected to high intensity ultrasound-stimulated pre-germination [J]. Food Control, 2020, 108: 1-10.
- [6] Bian Z X, Wang J F, Ma H, et al. Effect of microwave radiation on antioxidant capacities of Tartary buckwheat sprouts [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(10): 3913-3919.
- [7] Ragha L, Mishra, Seema, et al. Effects of low-power microwave fields on seed germination and growth rate [J]. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications, 2011, 3(5): 165-171.
- [8] Balint C, Oroian I, Surducan E, et al. Testing innovative technique based on microwave irradiation, for stimulating common bean germination and development [J]. Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture, 2015, 72(1): 13-17.
- [9] Ibrahim S, Bashir Y, Zaki S, et al. Consequences of microwave electromagnetic radiation exposure on germination and free proline content of green gram and red bean [J]. Reyaz uddin Research and Development Society, Jinnah University for Women, 2020, 11(1): 33-40.
- [10] Wang S, Wang J, Guo Y. Microwave irradiation enhances the germination rate of Tartary buckwheat and content of some compounds in its sprouts [J]. Polish Journal of Food & Nutrition Sciences, 2018, 68(3): 195-205.
- [11] 王顺民,卞紫秀,汪建飞,等.微波处理对豌豆种子萌发及芽苗中营养成分的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(5): 40-46.
- [12] Benlloch-Tinoco M, Igual M, Rodrigo D, et al. Comparison of microwaves and conventional thermal treatment on enzymes activity and antioxidant capacity of kiwifruit puree [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 19: 166-172.
- [13] Liu H K, Li Z H, Zhang X W, et al. The effects of ultrasound on the growth, nutritional quality and microbiological quality of sprouts [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 292-300.
- [14] Chiu K Y. Changes in microstructure, germination, sprout growth, phytochemical and microbial quality of ultrasonication treated adzuki bean seeds [J]. Agronomy, 2021, 11(6): 1093-1093.
- [15] 闫延鹏,郑杰,张雪梅,等.超声波对绿豆种子生长发育的影响[J].种子,2021,40(7):142-148.
- [16] Chiu K Y, Sung J M. Use of ultrasonic ation to enhance pea seed germination and microbial quality of pea sprouts [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(7): 1699-1706.
- [17] 武翠卿,武新慧,崔清亮,等.高压脉冲电场对高粱种子萌发特性影响研究[J].农机化研究,2021,43(1):138-145.
- [18] 陈建中,胡建芳,杜慧玲,等.优化高压电场处理对谷子种子萌发期内源激素的影响[J].农业工程学报,2016,32(13):286-292.
- [19] Sadhu S, Thirumdas R, Deshmukh R R, et al. Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiata*) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 78: 97-104.
- [20] Jo H L, Hwang H J, Chung M S. Inactivation of *Bacillus subtilis* spores at various germination and outgrowth stages using intense pulsed light [J]. Food Microbiology, 2019, 82(1): 409-415.
- [21] 袁典,刘宏权,韩会玲.NaCl 胁迫对绿豆种子萌发的影响[J].种子,2021,40(4):90-95,100.
- [22] Cangussu L, David A, Machado F, et al. Germination and vigor of black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars subjected to saline stress conditions [J]. Journal of Agricultural Science, 2020, 12(9): 159-170.
- [23] Khaket T P, Dhanda S, Jodha D, et al. Purification and biochemical characterization of dipeptidyl peptidase-II (DPP7) homologue from germinated *Vigna radiata* seeds [J].

- Bioorganic Chemistry, 2015, 63: 132-141.
- [24] Lim I, Kim B C, Park Y, et al. Metabolic and developmental changes in germination process of mung bean (*Vigna radiata* (L.) R. Wilczek) sprouts under different water spraying interval and duration [J]. Journal of Food Quality, 2022, 6256310.
- [25] 赵天瑶,张亚宏,常暖迎,等.绿豆萌发过程中绿豆蛋白的功能特性及其抗氧化性[J].食品工业科技,2018,39(5):69-75.
- [26] Yu W, Zhang G F, Wang W H, et al. Identification and comparison of proteomic and peptide profiles of mung bean seeds and sprouts [J]. BMC Chemistry, 2020, 14(1): 46-50.
- [27] Kartikeyan A, Vasudevan V, Peter A J, et al. Effect of incubation period on the glycosylated protein content in germinated and ungerminated seeds of mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 217: 633-651.
- [28] 靳晓琳,贾易天,张小梅,等.氯化钙处理对发芽绿豆营养品质和抗氧化能力的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(16): 151-158.
- [29] Zhang A W, Fu L X, Zuo F, et al. HPLC analysis of vitexin and isovitexin content changes during mung bean germination [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(4): 3302-3309.
- [30] Neetu D, Rita S R. Black soybean (*Glycine max* L.): Effect of soaking, boiling and germination on its nutritional quality [J]. Journal of Eco-friendly Agriculture, 2022, 17(1): 185-190.
- [31] 刘宏瑀,宋艳丽,王可心,等.萌发对小粒黑豆活性组分及抗氧化能力的影响研究[J].中国粮油学报,2022,37(12):100-105.
- [32] Vann K, Techaparin A, Apiraksakorn J. Beans germination as a potential tool for GABA-enriched tofu production [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(1): 1-8.
- [33] Huang J Y, Qian J N, Wang S S, et al. Effect of selenium biofortification on bioactive compounds and antioxidant activity in germinated black soybean [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(3): 1009-1019.
- [34] Min Y K, Jang G Y, Lee Y J, et al. Application of high hydrostatic pressure for production of bioactive soyasaponin from black soybean (*Glycine max* L.) sprout [J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2019, 7(4): 270-278.
- [35] 来吉祥.黑豆萌芽水提物抗氧化活性研究及其机理初探[D].无锡:江南大学,2014.
- [36] 姚虹,马建军.不同培养条件对红小豆种子萌发特性的影响[J].种子,2012,31(6):97-100.
- [37] 唐琦,胡广林,刘金芳,等.体外模拟消化对萌发红小豆的抗氧化活性的分析[J].食品科技,2018,43(1):67-71,76.
- [38] Samaila J, Ugochukwu N T, Joel N, et al. Influence of fermentation and germination on some bioactive components of selected lesser legumes indigenous to Nigeria [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2020, 2: 100086.
- [39] Jiang X J, Xu Q P, Zhang A W, et al. Revealing the hypoglycemic effects and mechanism of GABA-rich germinated adzuki beans on T2DM mice by untargeted serum metabolomics [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 791191.
- [40] Benkovic E T, Zigon D, Friedrich M, et al. Isolation, analysis and structures of phototoxic fagopyrins from buckwheat [J]. Food Chemistry, 2014, 143(15): 432-439.
- [41] 孙国娟,桂英,刘笑笑,等.荞麦芽的抗氧化活性研究[J].食品工业,2012,33(10):120-123.
- [42] Thakur P, Kumar K, Ahmed N, et al. Effect of soaking and germination treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.), quinoa (*Chenopodium quinoa* L.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.) [J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 917-925.
- [43] Lin L Y, Peng C C, Yang Y L, et al. Optimization of bioactive compounds in buckwheat sprouts and their effect on blood cholesterol in hamsters [J]. J Agric Food Chem, 2008, 56(4):1216-1223.
- [44] 凌阿静.荞麦发芽过程中多酚变化及对 HepG2 细胞氧化损伤的保护作用[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [45] Bae H G, Kim M J. Antioxidant and anti-obesity effects of *in vitro* digesta of germinated buckwheat [J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(7): 879-892.
- [46] Wang S M, Wang S M, Wang J Z, et al. Label-free quantitative proteomics reveals the mechanism of microwave-induced Tartary buckwheat germination and flavonoids enrichment [J]. Food Research International, 2022, 160: 111758.
- [47] Xiang J, Zhang M, Apea-Bah F B. et al. Hydroxycinnamic acid amide (HCAA) derivatives, flavonoid C-glycosides, phenolic acids and antioxidant properties of foxtail millet [J]. Food Chemistry, 2019, 295: 214-223.
- [48] Sharma S, Saxena D C, Riar C S. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with *in vitro* antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 863-870.
- [49] 李朋亮,刘莹莹,张爱霞,等.发芽糙小米挥发性成分的变化规律分析[J].食品科技,2022,47(1):177-183.
- [50] Navyashree N, Sengar A S, Sunil C, et al. White finger millet

- (KMR-340): A comparative study to determine the effect of processing and their characterisation [J]. Food Chemistry, 2021, 374: 131665.
- [51] Sharma R, Sharma S, Singh B. Modulation in the bio-functional & technological characteristics, *in vitro* digestibility, structural and molecular interactions during bioprocessing of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104372.
- [52] Ayet G, Burbano C, Cuadrado C, et al. Effect of germination, under different environmental conditions, on saponins, phytic acid and tannins in lentils (*Lens culinaris*) [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 1997, 74(2): 273-279.
- [53] Duodu K. Effects of processing on phenolic phytochemicals in cereals and legumes [J]. Cereal Foods World, 2014, 59: 64-70.
- [54] Wang H, Fu Y X, Zhao Q Y, et al. Effect of different processing methods on the millet polyphenols and their anti-diabetic potential [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1-8.
- [55] Momtaz S, Salek-Maghsoudi A, Abdolghaffari A H, et al. Polyphenols targeting diabetes via the AMP-activated protein kinase pathway; future approach to drug discovery [J]. Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences, 2019, 56(7): 1-21.
- [56] Zhang Y, Liu W, Zhang D, et al. Fermented and germinated processing improved the protective effects of foxtail millet whole grain against dextran sulfate sodium-induced acute ulcerative colitis and gut microbiota dysbiosis in C57BL/6 mice [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 491-512.
- [57] Subhiksha C, Elvira G M. Optimization, identification, and comparison of peptides from germinated chickpea (*Cicer arietinum*) protein hydrolysates using either papain or ficin and their relationship with markers of type 2 diabetes [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 1-10.
- [58] He Y N, Song S H, Li C, et al. Effect of germination on the main chemical compounds and 5-methyltetrahydrofolate metabolism of different quinoa varieties [J]. Food Research International, 2022, 159: 111601.
- [59] 刘婷婷,包佳微,李嘉欣,等.浸泡和发芽对杂豆酚类物质及其抗氧化性的影响[J].中国粮油学报,2019,34(8):26-33.
- [60] 姜秀杰,张桂芳,张东杰.真空协同发芽富集豌豆 $\gamma$ -氨基丁酸的工艺优化研究[J].食品科技,2020,45(5):58-63.
- [61] Liu S Y, Wang W, Lu H Y, et al. New perspectives on physiological, biochemical and bioactive components during germination of edible seeds: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 187-197.
- [62] Mridula D, Sharma M, Gupta R K. Development of quick cooking multi-grain dalia utilizing sprouted grains [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(9): 5826-5833.
- [63] Polat H, Capar T D, Inanir C, et al. Formulation of functional crackers enriched with germinated lentil extract: A response surface methodology box-behnken design-science direct [J]. LWT Food Sci Technol, 2020, 123: 109056.
- [64] Mandeep S S, Charanjit S R. Optimization and evaluation of composite flour cookies prepared from germinated triticale, kidney bean, and chickpea [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(1): 1-11.
- [65] Xing B, Zhang Z, Zhu M L, et al. The gluten structure, starch digestibility and quality properties of pasta supplemented with native or germinated quinoa flour [J]. Food Chemistry, 2022, 399: 133976.
- [66] Johanan E R, Maria M M R, Cristina C H, et al. Effects of the substitution of wheat flour with raw or germinated ayocote bean (*Phaseolus coccineus*) flour on the nutritional properties and quality of bread [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(9): 3766-3780.
- [67] Gadallah M. Rheological, organoleptical and quality characteristics of gluten-free rice cakes formulated with sorghum and germinated chickpea flours [J]. Food & Nutrition Sciences, 2017, 18(2): 201-206.
- [68] 朱云辉,晏晖,段元锋,等.发芽苦荞花生复合营养粉的研制[J].食品工业科技,2015,36(23),234-238,244
- [69] Cáceres P J, Peñas E, Martínez-Villaluenga A C, et al. Development of a multifunctional yogurt-like product from germinated brown rice [J]. Lebensmittel Wissenschaft and Technologie, 2019, 99: 306-312.
- [70] Ujirohene O J, Liu L, Zhang S W, et al. Antioxidant capacity of germinated quinoa-based yoghurt and concomitant effect of sprouting on its functional properties - Science direct [J]. LWT, 2019, 116: 108592-108592.
- [71] 邓春丽,邓日英,陈春岚,等.发芽黑豆乳的制备及其稳定剂配方优化研究[J].大豆科学,2022,41(1):73-82.
- [72] Aparicio-García N, Martínez-Villaluenga, C, Frias J, et al. Production and characterization of a novel gluten-free fermented beverage based on sprouted oat flour [J]. Foods, 2021, 10(1): 139-143.
- [73] Winarsi H, Septiana A T, Wulandari S P. Germination improves sensory, phenolic, protein content and anti-inflammatory properties of red kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) sprouts milk [J]. Food Research, 2020, 4(6): 1921-1928.



现代食品科技