

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.010

高琨, 谭斌, 汪丽萍, 等. 萌芽全谷物的研究现状、问题与机遇[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 71-80.

GAO K, TAN B, WANG L P, et al. The research status, problems and opportunities of sprouted whole grain[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 71-80.

# 萌芽全谷物的研究现状、问题与机遇

高 琨, 谭 斌✉, 汪丽萍, 刘艳香, 田晓红, 刘 明

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 中国 北京 100037)

**摘 要:** 近年来, 伴随人们对全谷物健康关注度逐年提高, 全谷物食品呈快速发展趋势。萌芽全谷物作为全谷物食品的重要配料, 其关注度也在不断提高。萌芽技术可以进一步提高全谷物制品的营养价值和生物有效利用率, 改善烘焙类产品感官品质, 并对慢性代谢综合症预防和控制具有积极作用。从萌芽全谷物定义、全谷物萌发分子机制、功能性成分及生理功效、抗营养因子抑制和加工等方面综述了萌芽全谷物研究发展现状, 分析萌芽全谷物产业存在问题, 并进一步提出未来萌芽全谷物研究发展建议, 以期为萌芽全谷物制备、加工、产品创制和政策制定等提供参考。

**关键词:** 萌芽; 全谷物; 营养品质; 食品开发

中图分类号: TS210.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)02-0071-10

## The Research Status, Problems and Opportunities of Sprouted Whole Grain

GAO Kun, TAN Bin✉, WANG Li-ping, LIU Yan-xiang, TIAN Xiao-hong, LIU Ming

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In recent years, with the increasing attention to whole grain health, whole grain food is developing rapidly. Sprouted whole grain, as an important ingredient of whole grain foods, also received a great attention. Germination treatment could further increase the nutritional value and bio-availability of whole grain products, improve the sensory quality of baked products, and have a positive effect on the prevention and control of chronic metabolic syndrome. The research achievements on the definition of sprouted whole grain, molecular mechanisms, bio-active compounds, beneficial functions, anti-nutritional factors and processing of sprouted whole grains were summarized in the paper, the problems in sprouted grain industry and the suggestions for future development of sprouted grain were further put forward. It is expected to provide some references for the preparation, processing, product creation and policy formulation of sprouted whole grain.

**Key words:** sprouting; whole grain; nutritional quality; food research and development

全谷物富含多种营养成分, 如酚类、类胡萝

卜素、生育酚、木酚素、阿拉伯木聚糖与  $\beta$ -葡聚糖等非淀粉多糖、甾醇和植酸等生理活性物质, 具有降血糖、抗氧化、预防生物大分子损伤和降血压等生理功能。但是, 全谷物中含有的麸皮与胚芽等导致全谷物食品加工过程中出现不易成型、货架期短、口感粗糙和消费者接受性差等问题, 制约全谷物食品产业发展<sup>[1]</sup>。现有研究表明物理加工技术(如挤压膨化技术、蒸汽爆破技术、

收稿日期: 2020-09-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0401002); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(ZX1931)

**Supported by:** National Key Research and Development Project (NO. 2018YFD0401002); Fundamental Research Funds of non-profit Central Institutes (No. ZX1931)

**作者简介:** 高琨, 女, 1987 年出生, 助理研究员, 博士, 研究方向为粮食加工。E-mail: gk@ags.ac.cn.

**通讯作者:** 谭斌, 男, 1972 年出生, 研究员, 博士, 研究方向为粮食加工。E-mail: tb@ags.ac.cn.

微粉化技术和超高压处理技术等)可以在一定程度上改善全谷物加工品质和延长全谷物产品货架期,但会造成全谷物部分营养素发生损失,因此在一定程度上限制了其在全谷物食品中的应用<sup>[2-5]</sup>。与物理加工技术不同,研究发现生物加工技术(萌芽技术、发酵技术及酶辅助加工技术)通过酶(外源酶和内源酶)解作用可以改善全谷物食品加工和食用品质,并提高全谷物食品营养品质和增强生理功能活性<sup>[1,6]</sup>。不同生物加工方法和工艺条件对全谷物制品加工品质、感官品质、功能活性及货架期的影响也不同。其中,萌芽技术被证实是一种有效提高谷物食品营养价值的生物方法,它不仅显著增加全谷物中 $\gamma$ -氨基丁酸(Gamma-aminobutyric acid, 以下简称 GABA)、酚类化合物和维生素等生物活性物质含量,降低植酸等抗营养因子含量,提高全谷物的消化率和生物利用率,且对高血脂、高血糖、高血压和肥胖等慢性代谢综合征预防和控制有积极作用,并在一定程度上改善全谷物烘培食品的感官品质<sup>[7-11]</sup>。本文从萌芽全谷物定义、全谷物萌芽分子机制、功能性成分及生理功效和加工等方面进行分析,探讨萌芽全谷物产业存在问题,并提出未来萌芽全谷物加工研究进一步发展建议,以期对萌芽全谷物制备、加工、产品创制和政策制定等提供参考。

## 1 萌芽全谷物定义

伴随萌芽技术不断发展,萌芽全谷物已成为健康功能食品市场中的新兴趋势。尽管目前萌芽全谷物没有国际统一定义,但根据 2008 年美国国际谷物化学家协会(AACC International)的规定,萌发的谷物如果含有麸皮、胚芽和胚乳,且营养价值没有下降,发芽长度不超过谷粒,则可以被归类为全谷物或萌芽全谷物<sup>[12-13]</sup>。

## 2 全谷物萌芽分子机制

### 2.1 萌发过程

萌发是指在特定条件下谷物通过吸胀作用激活籽粒内源酶诱导发生一系列有序生理反应和形态变化的生物学过程,大致可分为吸胀、萌发和出苗三个阶段(图 1):第一阶段是谷物种子迅速吸水并发生膨胀和形状改变,致使细胞内容物和基质发生水合反应,胚胎细胞壁松弛促使低分子量代谢物及细胞溶质从种子溶出,同时淀粉酶、蛋白酶和植酸酶等各种酶开始活化、糖酵解和戊糖磷酸氧化呼吸途径等呼吸反应增强,并伴随现有 mRNA 蛋白合成、DNA 和线粒体修复等一系列反应发生;第二阶段种子吸水速率减慢,新转录 mRNA 翻译合成蛋白质、DNA 和线粒体修复等反应继续,同时合成新的线粒体、新合成 mRNA

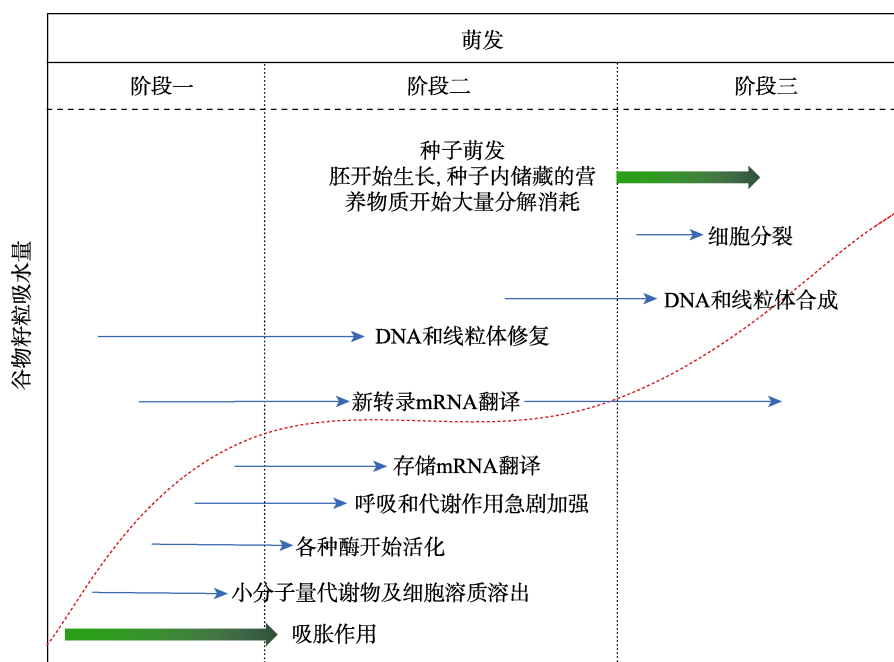


图 1 全谷物籽粒萌发阶段示意图<sup>[14-16]</sup>

Fig.1 The different germination stages of whole grains<sup>[14-16]</sup>

翻译合成蛋白质, 胚开始生长, 种皮覆盖层开始变薄, 种子内贮藏的营养物质开始大量分解消耗; 第三阶段种子吸水速率加快, 细胞发生有丝分裂, 种胚突破种皮, 露出胚根, 长出胚芽, 这一过程称为谷物萌发<sup>[14-16]</sup>。谷物萌发过程中发生的复杂生理代谢反应, 使得谷物的营养成分和理化性质发生了显著变化, 有利于全谷物营养价值提升, 对萌芽全谷物食品技术开发具有重要意义。

## 2.2 酶活力变化

谷物萌发过程中代谢反应所需能量主要来自谷物中淀粉降解, 其中  $\beta$ -淀粉酶和  $\alpha$ -淀粉酶分别是调控谷物萌芽前期和后期代谢的关键酶<sup>[16-17]</sup>。此外, 谷物萌芽过程中, 作用于淀粉  $\alpha$ -1,6 糖苷键的淀粉去分支酶亦被激活<sup>[12]</sup>。Jiamyangyuen 和 Ooraikul 研究发现萌芽处理可以缩短糙米蒸煮时间, 有效改善糙米的蒸煮和食用品质, 这可能与萌芽后期  $\alpha$ -淀粉酶对糙米淀粉作用结果有关<sup>[18]</sup>。Kalita 等发现伴随萌芽时间增加, 淀粉颗粒表面由光滑紧实向粗糙孔隙转变, 这可能是由于萌芽过程中淀粉酶吸附在淀粉颗粒表面指定位点并发生催化反应, 吸附位点可能与淀粉颗粒表面微量蛋白质和脂质种类与数量有关<sup>[19]</sup>。 $\alpha$ -淀粉酶活性变化可以在一定程度上反映萌芽全谷物萌发程度和状态, 部分萌芽谷物加工企业将  $\alpha$ -淀粉酶活性变化作为谷物萌芽程度重要评判指标。由于不同全谷物自身特性和加工适宜性存在显著差异, 如何通过调控全谷物中  $\alpha$ -淀粉酶活性变化来获得适

合加工不同全谷物产品的萌芽谷物配料有待于进一步开展相关研究。

## 3 发芽谷物功能性成分及生理功效

### 3.1 $\gamma$ -氨基丁酸

GABA 是一种四碳非蛋白氨基酸, 由谷氨酸经谷氨酸脱羧酶催化转化而来<sup>[20]</sup>, 广泛存在于动植物体内<sup>[21-22]</sup>。GABA 是人和动物中枢神经系统重要的抑制性神经递质, 还起到抑制血压上升, 减缓疼痛和焦虑, 预防及改善初老期精神障碍, 增加胰岛素分泌等作用<sup>[23-24]</sup>, 研究证明人食用富含 GABA 的功能食品有益于人体健康<sup>[25]</sup>。其中, 人和动物细胞中 GABA 合成能力和 GABA 的血脑屏障通透性随着衰老而逐渐降低<sup>[26]</sup>, 因此 GABA 在日本和中国等人口年龄高的国家被推荐为老年人口的膳食补充剂。中国卫生部在 2009 年批准 GABA 可作为新资源食品应用 (2009 年第 12 号), 并推荐每日摄入量不超过 500 mg。2015 年美国食品药品监督管理局批准 GABA 可作为一种功能食品配料 (GRAS Notice (GRN) No. 595, 2015)。谷物是 GABA 重要食物来源之一, 但谷物中 GABA 含量偏低不能满足人体需求。现有研究发现萌芽技术可以有效提高谷物中 GABA 含量 (表 1), 这主要归功于参与生物合成谷氨酸脱氢酶等内源酶活性增加。此外, 大量研究证实谷物种类、浸泡液种类和 pH 值、培育温度和时间及冷离子处理和超声波辅助处理等都会影响发芽谷物 GABA 富集<sup>[17,27-29]</sup>。

表 1 发芽处理对全谷物 GABA 含量影响

Table 1 Effect of germination treatment on GABA content in whole grains

原料类型	发芽条件	GABA (前)/(mg/100 g)	GABA (后)/(mg/100 g)	参考文献
糙米	水中浸泡时间为 36 h (浸泡温度 30 °C), 培育温度 35 °C, 相对湿度 90%, 发芽时间 36 h	23.8±1.74	68.4±4.43	[17]
全麦	水中浸泡时间为 6 h, 培育温度(28±2)°C, 相对湿度 95%±3%, 发芽时间 72 h	14.68±0.43	49.72±1.07	[27]
荞麦	水中浸泡时间为 12 h, 培育温度(20±1)°C, 相对湿度 85%~90%, 发芽时间 8 d	10.34±3.32	117.04±6.45	[29]
燕麦	水中浸泡时间为 4 h (浸泡温度 23~24 °C), 培育温度 (24±2)°C, 相对湿度 95%±3%, 发芽时间 24~96 h	9.47±1.05	(82.80±7.12)~ (297.69±37.22)	[28]
糙小米	水中浸泡时间为 12 h, 培育温度(25±2)°C, 相对湿度 85%~90%, 发芽时间 72 h	10.00	25.40	[30]
藜麦	水中浸泡时间为 6 h, 培育温度 12~28°C, 相对湿度 90%, 发芽时间 12~72 h	22.40	18.00~122.00	[31]

### 3.2 酚类化合物

现代流行病学研究表明, 长期食用全谷物及相关产品有助于降低心脑血管等慢性疾病发病率, 这与全谷物中含有特有的游离多酚类物质有关, 因此摄入全谷物食品是增加酚类物质摄入量一个非常好的来源<sup>[32]</sup>。全谷物中含有多种酚酸类化合物, 包括酚酸、花青素、醌类、黄酮醇、查耳酮、黄酮、黄烷酮类等, 研究证实萌芽有助于全谷物中酚类化合物含量显著增加, 这可能是由于萌发过程中谷物内源酶的合成和核的修饰会提高酚类化合物含量提高和增强其抗氧化活性<sup>[13]</sup>。大量实验表明糙米、小麦和燕麦等全谷物发芽后总酚及游离酚含量显著增高, 其中阿魏酸、对香豆酸、咖啡酸等酚酸化合物增加明显, 这可能与萌芽期间苯丙烷代谢途径酶被激活和共轭酚酸水解有关<sup>[33]</sup>。Merendino 等发现自发性高血压大鼠食用含有萌芽苦荞粉的意面后血压水平有所改善, 这可能与芦丁及槲皮素含量较高有关<sup>[34]</sup>。同时, 全谷物萌芽过程中不溶性细胞壁多糖部分酶解并被酚酯基取代, 有助于提高相关酚类化合物的生物利用度<sup>[35]</sup>。此外, 研究发现盐胁迫、超声波预处理、低温处理和光胁迫等非生物胁迫可以作为辅助技术促进萌芽全谷物多酚类化合物富集<sup>[28,35-36]</sup>。

### 3.3 膳食纤维

膳食纤维是一类可食用但不被胃肠道消化吸收的多糖类化合物, 依据水溶性可分为水溶性膳食纤维和不溶性膳食纤维。可溶性膳食纤维包括果胶、粘质物和半纤维素等, 有助于增加肠道粘度、降低血糖和胆固醇等生理作用, 而不可溶性膳食纤维包括细胞膜质等, 有助于促进胃肠道蠕动和防治便秘。全谷物(如全麦、糙米等)是膳食纤维重要食品来源, 大量研究表明发芽技术会影响全谷物膳食纤维含量和组成。Koehler 等研究发现同对照组比较, 全麦籽粒萌芽初期(0~96 h, 培育温度 20~25 °C)可溶性膳食纤维含量基本不变或小幅度降低, 随着萌芽时间延长(102 h 以后), 可溶性膳食纤维含量上升, 不可溶性膳食纤维含量下降, 但可溶性膳食纤维含量增加量高于不可溶性膳食纤维减少量, 因此萌芽全麦粉总膳

食纤维含量增加<sup>[37]</sup>。同时, 小麦品种对发芽全麦粉膳食纤维含量变化有显著影响, Ding 等研究发现随着发芽时间增加(0~24 h), 硬质红小麦中可溶性膳食纤维和总膳食纤维含量显著增加; 硬质白小麦可溶性膳食纤维含量先增后减, 不可溶性膳食纤维和总膳食纤维含量则先减后增; 软质白小麦可溶性膳食纤维含量先减后增, 不溶性膳食纤维和总纤维素含量先增后减<sup>[27]</sup>。

### 3.4 维生素

维生素是广泛存在于植物体内并对人体健康起到关键性作用的一组有机化合物, 通常可分为水溶性(B 族维生素和维生素 C)和脂溶性维生素(维生素 A, D, E 和 K 等)。最新研究报告表明萌芽有助于全谷物中 B 族维生素、维生素 C 和维生素 E 含量富集: 萌芽有助于提升全谷物中叶酸、核黄素和尼克酸等 B 族维生素含量, 其中叶酸含量增加最显著<sup>[38]</sup>; 有效改善全谷物中维生素 C 含量不足的缺陷<sup>[39]</sup>; 显著增加全谷物中维生素 E 含量, 特别是  $\alpha$ -生育酚含量显著增加。但是, 不同萌芽全谷物中硫胺素和吡哆素含量变化则显著不同, 研究发现萌芽后荞麦中硫胺素和吡哆素含量增加<sup>[40]</sup>, 但萌芽小麦中硫胺素和吡哆素含量小幅降低<sup>[41]</sup>。

### 3.5 生理功效

全谷物萌芽过程中籽粒内部发生的一系列有序生化反应, 促使谷物生理功效发生变化, 生成或富集 GABA、 $\gamma$ -谷维素和膳食纤维等生物活性组分, 这些物质共同协作对慢性代谢综合征预防和控制具有积极作用: 一是可以抑制抗利尿激素和垂体后叶加压素的分泌, 降低血管紧张素 I 转换酶活性、抑制血管收缩, 保护动脉内皮细胞免受氧化应激的影响, 降低自发性高血压<sup>[42-44]</sup>; 二是可以有效抑制脂质在血管壁和肝脏中的沉积, 缓解脂质代谢紊乱, 改善体内脂质代谢, 有效降低血脂异常人群血脂水平, 显著改善高脂血症, 有效降低动脉粥样硬化的心血管疾病风险<sup>[45-46]</sup>; 三是有助于促使胰岛素释放量增加, 降低血糖指数, 改善 II 型糖尿病患者代谢指标<sup>[47-50]</sup>; 四是改善肥胖患者的代谢并减少肥胖并发症的发生<sup>[49]</sup>; 五是改善大脑机能, 促进长期记忆等; 六是发芽

处理可以抑制糙米等全谷物中蛋白质酶活性,减少糙米等全谷物中常见过敏源物质<sup>[51]</sup>;七是有助于肝、肾功能活化,促进乙醇代谢等。

#### 4 抗营养因子抑制作用

植酸是全谷物中常见的一种抗营养物质,可与矿物质和蛋白质螯合形成不溶性的复合物,降低矿物质的生理利用率和氨基酸的吸收率,同时对部分消化酶起到抑制作用,降低全谷物中蛋白质、淀粉和脂肪的利用率<sup>[52]</sup>。大量研究结果表明萌芽有助于降低全谷物中植酸含量,提高全谷物中生物活性物质的吸收利用率。以糙米为例,糙米发芽浸渍过程中植酸含量下降幅度较小(14%~28%),而在培育过程中植酸含量降低幅度较为显著(最大降幅为60%左右)<sup>[53]</sup>。糙米经发芽处理后植酸酶活性增强,促使矿物质元素呈游离态,从而大幅提高糙米中矿物元素生物有效性,且一些原来不能消化的营养组分也能被有效地吸收,因此糙米食用安全和营养品质均得到较大改善。一些研究还发现萌芽培育时间对谷物中植酸含量影响最为显著,且植酸含量随着培育时间延长而降低,不同部位植酸含量降低幅度不同。同时,研究发现萌芽处理有助于降低荞麦全谷物籽粒、荞麦麸皮粉及芯粉中植酸含量,并能够显著降低荞麦蛋白酶抑制剂的含量,提高蛋白质吸收质量<sup>[54]</sup>。

### 5 萌芽全谷物加工现状

#### 5.1 萌发工艺

谷物发芽根据加水和干燥方法不同,可以分成浸泡法、微量加水法和高温高湿法。浸泡法主要是将具备完整的胚芽且后熟作用完成的当年新产全谷物浸泡于20~40℃的水中,使谷物水分达到30%以上并完成发芽培育<sup>[11]</sup>。浸泡法根据后续是否经过干燥处理又可分为湿法加工和干法加工:湿法加工是指全谷物发芽后,不经干燥直接保存(通常以真空包装保存),或经捣碎成泥或浓浆(通常以冷冻形式出售)后用来制成面包、玉米饼、松饼和其他通常被称为“无面粉”食品的配料;干法加工是指全谷物发芽后经干燥处理至水分含量15%以下,将其处于相对稳定状态保存,或进一步研磨成发芽谷物粉后进行储存或者加工<sup>[27]</sup>。不同萌芽工艺对萌芽谷物加工适宜性影响较大,

目前发芽糙米萌芽工艺较其他全谷物萌芽工艺相对成熟。以发芽糙米为例,浸泡法获得的发芽糙米由于爆腰粒多不能进行碾米加工,通常与精制白米混合后食用,另外全谷物浸泡过程中水溶性的功能性成分会流失到浸泡液中,导致浸泡液处理成本高。微量加水法和高温高湿法将全谷物水分逐步地提高到17%~22%,利用萌芽初期的酶活性增加功能性成分,然后进行干燥和进一步加工(轻碾和制粉),而且微量加水法和高温高湿法的发芽糙米基本上没有爆腰粒,适合加工成萌芽留胚米和发芽米。

#### 5.2 萌芽全谷物主食配料

##### 5.2.1 萌芽全谷物米

全谷物经过萌芽处理后可以加工成为萌芽全谷物米直接食用,也可以进一步加工成为萌芽留胚米等食用。与全谷物相比,萌芽全谷物不仅可以提供更多的营养素(如GABA、酚类化合物和维生素等),还可以克服全谷物(如糙米)不易烹饪和咀嚼性差等问题,结果表明发芽技术有助于将大麦、高粱和小米等全谷物的烹饪时间缩短了约50%以上<sup>[55]</sup>。尽管萌芽可以改善全谷物米蒸煮和食用品质,但是其感官品质和货架期仍与精制谷物存在差距,导致消费者接受性不强。以糙米为例,发芽糙米从日本引进至我国已有十余年,但国内市场相关产品较少,这不仅与发芽糙米适口性差、易产生异味和储存期短有关<sup>[56]</sup>,另外我国发芽糙米产业化生产产品品质稳定性较差、生产率低、经济成本高和专用生产设备缺乏等问题也限制了发芽糙米产业发展<sup>[57-58]</sup>。近年来,热/非热加工和生物发酵等辅助技术被应用到萌芽全谷物加工中,用于改善萌芽全谷物产品适口性差等问题,研究发现超高压处理(300 MPa下)会改变谷物结构,有助于发芽糙米中的矿物质释放并提高其生物利用度<sup>[59]</sup>,同时还发现表明萌芽使得糙米挥发性化合物减小而影响风味,但超高压处理通过加速老化过程来解决因发芽糙米挥发性化合物减小而导致风味下降问题,通过促进醛、醇和酮化化合物的形成,产生令人愉悦的香气,并有助于改善萌芽全谷物风味<sup>[60]</sup>;蒸汽预糊化有助于进一步缩短发芽糙米的蒸煮时间,增大蒸煮吸水率和体积膨胀率,降低固形物损失率,这可能与预糊化处

理破坏了发芽糙米的糠层结构及内部结构并使其淀粉颗粒结构发生变化有关<sup>[61]</sup>；利用微生物生物发酵（黑曲霉、根霉等）将发芽糙米皮层中纤维素、半纤维素、木质素等物质进行部分降解，破坏糠层的致密结构，增加发芽糙米吸水速度，提高出饭率，改善发芽糙米品质，且在发酵过程中还可以释放结合态的生理活性物质，同时合成新的活性物质、降解抗营养因子<sup>[62]</sup>。此外，烹饪方式对萌芽全谷物米的使用品质也会产生影响，Konwatchara 和 Ahromrit 研究发现高压蒸煮的萌芽黑糯米饭比微波烹饪的萌芽黑糯米饭更湿润和粘稠，而且 GABA 和  $\gamma$ -谷维素的含量以及抗氧化活性更高<sup>[63]</sup>。因此，在保证营养价值不变的前提下，如何应用食品科技技术改善萌芽全谷物粒食产品的适口性和货架期等问题仍需要进一步开展研究。

### 5.2.2 萌芽全谷物粉

萌芽全谷物粉是全谷物食品加工主要配料，与未萌芽全谷物相比较，萌芽会引发谷物胚乳区域形成裂纹，改变谷物降籽粒强度性能（如硬度下降），使得谷物更易碾磨且粉体颗粒粒径更小<sup>[64-65]</sup>。由于全谷物萌芽过程中诱导大量酶被激活，使得大量淀粉和蛋白质水解，因此会对萌芽全谷物粉加工品质和终产品感官品质产生双向影响。一方面，研究发现全谷物萌芽过程中伴随着酶活性的增强，导致面粉品质劣变，出现降落数值降低，脂肪酸值升高和湿面筋含量下降等问题出现：以全麦粉为例，随着萌芽时间增加，超声辅助萌芽处理后全麦粉降落数值显著降低，降落数值过低易导致萌芽全麦粉面团发酵性能和烘焙性能下降，降落数值过高烘焙性能也会下降<sup>[27]</sup>；随着萌芽时间延长，全麦粉脂肪酸值显著增加，由高到低依次为中筋小麦、高筋小麦和低筋小麦<sup>[66]</sup>；随着萌芽小麦粉添加量增加，混合小麦粉面团形成时间下降，面团稳定时间下降，弱化度越大，面团筋力下降，烘焙特性不佳<sup>[67]</sup>。另一方面，一些研究发现少量添加萌芽全谷物粉（<5%）则有助于改善发芽全谷物食品感官品质，发芽全麦粉糊化特性和粘度参数随萌发时间延长均显著降低，淀粉稳定性增加，有助于提升终产品感官品质（质构特性等）<sup>[27,68]</sup>，这可能与萌芽全麦粉中葡萄糖等小分子糖含量增加有关。与未萌芽全麦

粉和穗发芽全麦粉相比，少量添加萌芽全麦粉可以作为一种酶促改良剂，有助于提升面团发酵过程中产气量、缩短面团发酵时间、增大面包体积和提高货架期间面包松软度，有助于改善面包烘焙质量<sup>[69-74]</sup>。综上所述，全谷物萌发程度和萌发全谷物的添加量对粉食产品加工和食用品质具有至关重要作用，添加适量萌芽谷物粉可以提高烘焙类全谷物食品感官品质。与萌芽谷物粒食研究相比，关于萌芽全谷物粉及其制品风味、色泽、质地等食用品质评价和形成机制研究相对较少，有待进一步开展相关研究系统分析萌芽处理对全谷物粉加工和食用品质的影响。

## 6 存在问题及建议

### 6.1 谷物萌芽品质基准尚无标准，亟待建立统一标准

目前国内外萌芽全谷物定义和品质基准尚未达成统一共识，尽管美国国际谷物化学家协会对萌芽全谷物进行定义，但关于谷物萌芽程度判定、萌芽率评判（一批次）和检测方法等实际生产问题尚没有统一定论，生产企业一般都是按照自己制定的企业标准执行。以发芽糙米为例，日本 2008 年发布了发芽糙米产品标准，社团法人日本发芽糙米协会制定了发芽糙米的品质基准，规定发芽糙米中 GABA 含量需要在 15 mg/100 g 左右。我国分别于 2018 年和 2019 年由农业部发布了行业标准《发芽糙米》和《发芽糙米加工技术规范》，规定发芽糙米芽长为 0.5~3 mm 为宜，GABA 含量需不少于 13 mg/100 g 左右，但是其他萌芽全谷物尚未有相应现行的国际或者国家标准。美国全谷物理事会在 2015 年成立了“萌芽全谷物工作组”，通过邀请来自 28 家萌芽全谷物生产企业 47 名专家代表参与研究工作，希望借此深入了解目前行业内最佳做法，并促进萌芽全谷物定义/标准达成统一共识，目前此项工作正在开展，尚未形成统一定论。随着萌芽全谷物生产和应用不断扩大，亟待制定萌芽全谷物产品标准，使萌芽全谷物的生产规范化和标准化，建立适应中国主食化特色的规范加工标准，增强我国健康谷物精深加工产品的国内外市场竞争力。



## 6.2 萌芽全谷物相关研究滞后, 产业化推广尚需一个过程

近年来, 国内外对全谷物食品及功能特性研究越来越多, 但对萌芽全谷物的相关研究相对较少。尤其是萌芽方式(浸泡、微量加水法和高温高湿)和加工(原料选择、加工方式和食用方式等)等因素对萌芽全谷物加工适宜性、营养与健康作用、生理活性组分及生物有效性, 萌芽全谷物食品与慢性疾病关系、萌芽全谷物食品的消费需求、萌芽全谷物食品的加工技术与产品开发、萌芽全谷物食品安全及控制和专用设备研发等方面有待加强。

## 6.3 民众认识度不高, 亟待加强科普宣传

当前民众对全谷物食品的营养与健康关注度日益增强, 但对萌芽全谷物食品认知显著不足甚至空白, 应积极搭建萌芽全谷物推广平台, 构建萌芽全谷物食品发展和推广长效机制。充分利用当前互联网等多媒体线上线下平台, 通过科普宣传和消费引领等多种方式, 全方位加强萌芽全谷物营养健康知识、食用方法和萌芽全谷物食物选择等知识普及, 引导消费者(特别是青少年)科学选择萌芽全谷物食品。

## 7 结论与展望

经过近些年的发展, 我国全谷物食品产业已取得一些成果, 但总体来说仍处于发展初期阶段, 全谷物食品感官品质差、安全性存在隐患、货架期较短和产量受限等问题限制了全谷物产业发展和产品推广。现有研究表明萌芽技术不仅可以赋予全谷物食品更高的营养品质, 而且在一定程度上改善全谷物米的蒸煮品质及烘焙全谷物食品的感官品质。当前萌芽谷物粒食研究相对较多且相对成熟, 萌芽全谷物粉作为全谷物食品配料具有较好的应用前景, 但相对研究较少, 有待于进一步开展相关研究。但总体而言, 萌芽技术仍面临现有理论研究零散且不成体系、产品评判方法不统一、检测方法不完善、标准体系不健全等诸多问题, 在一定程度上限制萌芽技术在全谷物食品中的应用。因此, 萌芽全谷物产业化发展仍有一段较长的路要走, 未来我们急需要业内学者共同

关注, 在前面提到的谷物萌芽程度、检测方法及萌芽全谷物食品标准三个层面上抓紧标准的制定, 逐步建立我国的全谷物食品标准体系, 指导企业生产, 规范行业发展, 让民众能够真正从萌芽全谷物食品受益。加大科技创新力度, 围绕萌芽全谷物产品加工与技术研究示范、萌芽全谷物营养与代谢研究等方面开展深入研究, 构建萌芽全谷物加工数据库, 解决萌芽全谷物加工基础性数据缺乏问题, 为萌芽全谷物产业化发展及相关标准等政策制定提供数据支撑。同时, 加强跨区域国际合作交流, 积极参与全谷物相关国际组织相关研究工作, 增强我国在国际组织中话语权。未来, 我国萌芽全谷物市场发展潜力巨大, 应抓住机会大力发展萌芽全谷物主食化, 提升国民主食中萌芽全谷物食品摄入比例, 达到改善国民营养健康的目标。

### 参考文献:

- [1] 谭斌, 乔聪聪. 中国全谷物食品产业的困境、机遇与发展思考[J]. 生物产业技术, 2019, (6): 64-74.  
TAN B, QIAO C C. Dilemma, opportunity and thoughts on development of China whole grain food industry[J]. Biotechnology & Business, 2019, (6): 64-74.
- [2] 汪丽萍, 刘宏, 田晓红, 等. 挤压处理对麸皮、胚芽及全麦粉品质的影响研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 141-144.  
WANG L P, LIU H, TIAN X H. Research of influence on quality of bran, germ and whole-wheat flour by extrusion processing[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2012, 33(16): 141-144.
- [3] 刘艳香, 汪丽萍, 谭斌, 等. 麸胚挤压稳定化处理对全麦挂面品质特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(19): 156-163.  
LIU Y X, WANG L P, TAN B. Effect of extrusion stabilization of wheat bran and embryo on the properties of whole wheat noodles[J]. Food science, 2019, 40(19): 156-163.
- [4] 苏玉. 蒸汽爆破-超微粉碎技术对米糠膳食纤维的改性及功能性质的研究[D]. 中南林业科技大学, 2019.  
SU Y. Study on modification and functional properties of rice bran dietary fiber by steam blasting-ultramicro-crushing technology[D]. Central South University of Forestry & Technology, 2019.
- [5] 詹耀. 超高压处理对糙米物性品质的影响研究[D]. 浙江大学, 2014.  
ZHAN Y. Effect of high pressure treatment on physical quality of brown rice[D]. Zhejiang University, 2014.
- [6] 李娟娟, 刘艺欢, 陈东方, 等. 谷物制品的生物加工研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 358-363.  
LI J J, LIU Y H, CHEN D F, et al. Research progress of

- bio-processing of cereal products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(13): 358-363.
- [7] 李忍, 吴娜娜, 李志江, 等. 发芽全谷物的营养品质及功能特性[J]. *中国粮油学报*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20200904.1731.024.html>.
- LI R, WU N N, LI Z J, et al. Nutritional quality and functional properties of sprouted whole grains[J]. *Journal of The Chinese Cereals and Oils Association*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20200904.1731.024.html>.
- [8] 李忍, 吴娜娜, 李志江, 等. 发芽结合其他加工方式对全谷物的营养品质及感官特性的影响[J/OL]. *中国粮油学报*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20200905.1512.016.html>.
- LI R, WU N N, LI Z J, et al. The effect of germination combined with other processing methods on the nutritional quality and sensory properties of whole grains[J]. *Journal of The Chinese Cereals and Oils Association*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20200905.1512.016.html>.
- [9] CHO D H, LIM S T. Germinated brown rice and its bio-functional compounds[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 259-271.
- [10] BENINCASA P, FAICINELI B, LUTTS S, et al. Sprouted grains: a comprehensive review[J]. *Nutrients*, 2019, 11: 421.
- [11] FENG H, NEMZER B, DEVRIES J. Sprouted grains nutritional value, production, and applications[M]. Elsevier Inc. 2019.
- [12] SHABIR A M, ANNAMALAI M, MANZOOR Z S. Whole grain processing, product development, and nutritional aspects[M]. London: Taylor & Francis Group, 2019.
- [13] 徐汇, 梅新, 李书艺, 等. 非生物胁迫对发芽谷物多酚的影响研究进展[J]. *食品工业科技*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200429.1036.014.html>.
- XU H, MEI X, LI S Y, et al. Progress in research on abiotic stress affecting polyphenols of sprouted cereal[J]. *science and technology of food industry*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200429.1036.014.html>.
- [14] NONOGAKI H, BASSEL G W, BEWLEY J D. Germination—Still a mystery[J]. *Plant Science*, 2010, 179: 574-581.
- [15] 李香勇, 龚魁杰, 陈利容, 等. 发芽谷物营养及功能成分变化研究进展[J]. *农产品加工*, 2015, 392(9): 76-78.
- LI X Y, GONG K J, CHEN L R, et al. Advances in nutrient and functional components changing of germinating grains[J]. *Farm Products Processing*, 2015, 392(9): 76-78.
- [16] PALMIANO E P, JULIANO O J. Biochemical changes in the rice grain during germination[J]. *Plant Physiology*, 1972, 49: 751-756.
- [17] MOONGNARM A, SAETUNG N. Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122: 782-788.
- [18] JIAMYANGYUEN S, OORAIKUL B. The physico-chemical, eating and sensorial properties of germinated brown rice[J]. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2008, 6: 119-124.
- [19] KALITA D, SARMA B, SRIVASTAVA B. Influence of germination conditions on malting potential of low and normal amylose paddy and changes in enzymatic activity and physico chemical properties[J]. *Food Chemistry*, 2017, 220: 67-75.
- [20] BOWN A W, SHEL P B J. The metabolism and functions of gamma-aminobutyric acid[J]. *Plant Physiol*, 1997, 115: 1-5.
- [21] BOWN A W, SHEL P B J. Plant GABA: not just a metabolite[J]. *Trends in plant science*, 2016, 21(10), 811-813.
- [22] UEHARA E, HOKAZONO H, SASAKI T, et al. Effects of GABA on the expression of type I collagen gene in normal human dermal fibroblasts[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2017, 81(2): 376-379.
- [23] ADEGHATE E, PONERY A S. GABA in the endocrine pancreas: cellular localization and unctio n in normal and diabetic rats[J]. *Tissue Cell*, 2002, 34:1-6.
- [24] MODY I, DE KONINCK Y, OTIS T S, et al. Bridging the cleft at gaba synapses in the brain[J]. *Trends Neurosci*, 1994, 17: 517-525.
- [25] PALMER L M, SCHULZ J M, MURPHY S C, et al. The cellular basis of GABAB-mediated interhemispheric inhibition[J]. *Science*, 2012, (80): 989-993.
- [26] LEVENTHAL A G, WANG Y C, PU M L, et al. Gamma-aminobutyric acid and its agonists improved senescent monkeys[J]. *Science*, 2003, 300: 812-815.
- [27] DING J, HOU G G, NEMZER B V, et al. Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced  $\gamma$ -aminobutyric acid accumulation by ultrasonication[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243(15): 214-221.
- [28] DING J, JOHNSON J, CHU Y F, et al. Enhancement of  $\gamma$ -aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (*Avena sativa* L.) treated with and without power ultrasound[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 239-247.
- [29] HAO J, WU T, LI H, et al. Dual effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) treatment on the accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) and rutin in germinated buckwheat[J]. *Food Chemistry*, 2016, 201: 87-93.
- [30] LI X, HAO J, LIU X, et al. Effect of the treatment by slightly acidic electrolyzed water on the accumulation of gamma-aminobutyric acid in germinated brown millet[J]. *Food Chemistry*, 2015, 186: 249-255.
- [31] PAUCAR-MENACHO L M, MARTINEZ-VILLALUENGA C, DUENAS M et al. Response surface optimisation of germination conditions to improve the accumulation of bioactive compounds and the antioxidant activity in quinoa[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53: 516-524.
- [32] 翟玮玮. 萌发谷物中多酚类物质与苯丙氨酸解氨酶的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(8): 370-372+376.



- ZHAI W W. Research progress of phenolic compounds and phenylalanine ammonia-lyase in pre-germinated grains[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(8): 370-372+376.
- [33] CHO D H, LIM S T. Changes in phenolic acid composition and associate enzyme activity in shoot and kernel fractions of brown rice during germination[J]. Food Chemistry, 2018, (256): 163-170.
- [34] MERENDINO N, MOLINARI R, COSTANTINI L, et al. A new 'functional' pasta containing tartary buckwheat sprouts as an ingredient improves the oxidative status and normalizes some blood pressure parameters in spontaneously hypertensive rats[J]. Food & Function., 2014, 5(5): 1017-1026.
- [35] LEE S, SEO J M, LEE M, et al. Influence of different led lamps on the production of phenolic compounds in common and Tartary buckwheat sprouts[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 54: 320-326.
- [36] STAGNARI F, GALIENI A, D'EGIDIO S, et al. Effects of sprouting and salt stress on polyphenol composition and antiradical activity of einkorn, emmer and durum wheat[J]. Italian Journal of Agronomy, 2017, 12(4): 293-301.
- [37] KOEHLER P, GEORG H, HERBERT W, et al. Changes of folates, dietary fiber, and proteins in wheat as affected by germination[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55: 4678-4683.
- [38] HEFNI M, WITTHÖFT C M. Increasing the folate content in Egyptian baladi bread using germinated wheat flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(3): 706-712.
- [39] GAN R Y, WANG M F, YEE L W, et al. Dynamic changes in phytochemical composition and antioxidant capacity in green and black mung bean (*Vigna radiata*) sprouts[J]. International Journal of Food ence & Technology, 2016, 51(9): 2090-2098.
- [40] 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): 319-327.
- [41] ZILIC S, BASIC Z, SUKALOVIC H T, et al. Can the sprouting process applied to wheat improve the contents of vitamins and phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour?[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(4): 1040-1047.
- [42] KIM D W, HWANG I K, LIM S S, et al. Germinated buckwheat extract decreases blood pressure and nitrotyrosine immunoreactivity in aortic endothelial cells in spontaneously hypertensive rats[J]. Phytotherapy Research, 2010, 24(1): 993-998.
- [43] NAKAMURA K, NARAMOTO K, KOYAMA M. Blood-pressure-lowering effect of fermented buckwheat sprouts in spontaneously hypertensive rats[J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(1): 406-415.
- [44] 符琼, 周文化, 黄卫文, 等. 发芽糙米生物活性物质及生理功能研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, (14): 325-333.
- FU Q, ZHOU W H, HUANG W W, et al. Research progress on bioactive substances and physiological function of germinated brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, (14): 325-333.
- [45] LEE Y R, KIM C E, KANG M Y, et al. Cholesterol-lowering and antioxidant status-improving efficacy of germinated giant embryonic rice (*Oryza sativa* L.) in high cholesterol-fed rats.[J]. Annals of Nutrition & Metabolism, 2007, 51(6): 519-526.
- [46] 张佳丽, 张爱霞, 赵巍, 等. 发芽粟米对高血脂症小鼠血脂调节和抗氧化作用的研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 37-44.
- ZHANG J L, ZHANG A X, ZHAO W. Effects of germinated millet on blood lipid and antioxidation in hyperlipidemia mice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(3): 37-44.
- [47] SEKI T, NAGASE R, TORIMITSU M, et al. Insoluble fiber is a major constituent responsible for lowering the post-prandial blood glucose concentration in the pre-germinated brown rice (biopharmacy)[J]. Biological & pharmaceutical bulletin, 2005, 28(8): 1539-1541.
- [48] USUKI S, TSAI Y Y, MORIKAWA K, et al. IGF-1 induction by acylated steryl  $\beta$ -glucosides found in a pre-germinated brown rice diet reduces oxidative stress in streptozotocin-induced Diabetes[J]. Plos One, 2011, 6(12): e28693.
- [49] MOFIDI A, FERRARO Z M, STEWART K A, et al. The acute impact of ingestion of sourdough and whole-grain breads on blood glucose, insulin, and incretins in overweight and obese men[J]. Journal of Nutrition & Metabolism, 2012, (12): 84710.
- [50] TANEERA J, JIN Z, JIN Y, et al.  $\gamma$ -Aminobutyric acid (GABA) signalling in human pancreatic islets is altered in type 2 diabetes[J]. Diabetologia, 2012, 55(7): 1985-1994.
- [51] YAMADA C, IZUMI H, HIRANO J, et al. Degradation of soluble proteins including some allergens in brown rice grains by endogenous proteolytic activity during germination and heat-processing[J]. Bioence Biotechnology & Biochemistry, 2005, 69(10): 1877-1883.
- [52] MÜNTZ K. Proteases and proteolytic cleavage of storage proteins in developing and germinating dicotyledonous seeds[J]. Journal of Experimental Botany, 1996, 47(5): 605-622.
- [53] LIANG J, HAN B Z, NOUT M J R, et al. Effects of soaking, germination and fermentation on phytic acid, total and in vitro soluble zinc in brown rice[J]. Food Chemistry, 2008, 110(4): 821-828.
- [54] 高芬, 王宇婷, 石磊. 荞麦发芽过程中植酸含量变化的研究[J]. 农产品加工, 2019, 483(7): 59-66.
- GAO F, WANG Y T, SHI L. Study on the change of phytic acid content in buckwheat germination process[J]. Farm Products Processing, 2019, 483(7): 59-66.
- [55] 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.
- [56] 谭斌, 刘明, 吴娜娜, 等. 发展糙米全谷物食品改善国民健康状况[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 2-5.
- TAN B, LIU M, WU N N, et al. Development of brown rice whole grain food to improve people's health[J]. *Food & Machinery*, 2012, 28(5): 2-5.
- [57] 韩璐, 朱力杰, 王勃, 等. 发芽糙米食品研究现状及展望[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(13): 324-329.
- HAN L, ZHU L J, WANG B, et al. Research status and prospect of germinated brown rice[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 38(13): 324-329.
- [58] 尤颖. 发芽糙米的研究现状及发展前景[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(3): 14-15.
- YOU Y. Research status and development prospects of germinated brown rice[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(3): 14-15.
- [59] XIA Q, MEI J, YU W, et al. High hydrostatic pressure treatments enhance volatile components of pre-germinated brown rice revealed by aromatic fingerprinting based on HS-SPME/GCMS and chemometric methods[J]. *Food Research International*. 2017a, (91): 103114.
- [60] XIA Q, TAO H, HUANG P, et al. Minerals in vitro bioaccessibility and changes in textural and structural characteristics of uncooked pre-germinated brown rice influenced by ultra-high pressure[J]. *Food Control*, 2017b, 71: 336345.
- [61] 孔祺, 李星骆, 刘庆庆. 蒸汽预糊化处理对发芽糙米结构及吸水特性的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(12): 193-198.
- KONG Q, LI X L, LIU Q Q. Effects of steam gelatinization on the structure and water absorption characteristics of germinated brown rice[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(12): 193-198.
- [62] 赵旭, 高树成, 李佳. 加工方式对发芽糙米理化性质影响研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(4): 13-15.
- ZHAO X, GAO S C, LI J. Effects of steam gelatinization on the structure and water absorption characteristics of germinated brown rice[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(4): 13-15.
- [63] KONWATCHARA T, AHROMRIT A. Effect of cooking on functional properties of germinated black glutinous rice (KKU-ULR012)[J]. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 2014, 36(3): 283-290.
- [64] NEETHIRAJAN S, JAYAS D S, WHITE N D G. Detection of sprouted wheat kernels using soft X-ray image analysis[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 81(3): 509513.
- [65] VADIVAMBAL R, CHELLADURAI V, JAYAS D S, et al. Detection of sproutdamaged wheat using thermal imaging[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2010, 26(6): 999-1004.
- [66] 魏雪芹, 苏东民, 李里特. 发芽处理对小麦生物化学品质的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学)版*, 2009, 30(1): 58-61.
- WEI X Q, SU M D, LI L T. Effect of germination on wheat biochemical quality[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 30(1): 58-61.
- [67] 白雪莲, 张国权, 章华为. 发芽小麦与正常小麦混合后的品质研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2006, (2): 8-10.
- BAI X L, ZHANG G Q, ZHANG H W. On quality characteristics of normal wheat mixed with germinated wheat[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2006, (2): 8-10.
- [68] 张艳, 王彦飞, 陈新民, 等. Mixolab 参数与粉质、拉伸参数及面包烘烤品质的关系[J]. *作物学报*, 2009, (9): 174-179.
- ZHANG Y, WANG Y F, CHEN X M, et al. Relationships of mixolab parameters with farinograph, extensograph parameters, and bread-making quality[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, (9): 174-179.
- [69] BARANZELLI J, KRINGEL D H, COLUSSI R, et al. Changes in enzymatic activity, technological quality and gamma-aminobutyric acid (GABA) content of wheat flour as affected by germination[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2018, 90: 483-490.
- [70] MARTI A, CARDONE G, NICOLODI A, et al. Sprouted wheat as an alternative to conventional flour improvers in bread-making[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2017, 80: 230-236.
- [71] MARTI A, CARDONE G, PAGANI M A, et al. Flour from sprouted wheat as a new ingredient in bread-making[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2018, (89): 237-243.
- [72] PARK S H. Dough and breadmaking properties of wheat flour substituted by 10% with germinated quinoa flour[J]. *Food ence & Technology International*, 2005, 11(6): 471-476.
- [73] DIOWKSZ A, KORDIALIK-BOGACKA E, Ambroziak W. Se-enriched sprouted seeds as functional additives in sourdough fermentation[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2014, 56(2): 524-528.
- [74] ZIEGLER J U, FLOCKERZIE M, LONGIN C F H, et al. Development of lipophilic antioxidants and chloroplasts during the sprouting of diverse triticum spp[J]. *Journal of agricultural & Food Chemistry*, 2016, 64(4): 913-922. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。