

杂粮芽苗菜的营养与功能研究进展

曹亚楠, 向月, 杨斯惠, 任远航, 邹亮, 赵钢, 彭镰心

Research Progress on Nutrition and Function of Coarse Grain Sprouts

CAO Yanan, XIANG Yue, YANG Sihui, REN Yuanhang, ZOU Liang, ZHAO Gang, and PENG Lianxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080290>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

辣木叶的营养、功能及应用研究进展

Research Progress on Nutrition, Function and Application of *Moringa oleifera* Leaves

食品工业科技. 2021, 42(21): 435-444

杂粮营养功能与安全研究进展

Advances in the Nutritional Function and Safety of Coarse Cereals

食品工业科技. 2021, 42(14): 362-370

羊胎盘肽研究与利用进展

Research Progress on Sheep Placenta Peptide and Its Utilization

食品工业科技. 2019, 40(5): 286-290

茶褐素的组成结构与功能活性研究进展

Research progress in composition structure and functional activity of Theabrownin

食品工业科技. 2017(05): 396-400

发芽花生生产工艺、发芽过程中营养成分变化及加工利用研究进展

Advances in the Research of Preparation Technology, Nutrient Composition Change, Processing and Utilization of Germinated Peanuts

食品工业科技. 2019, 40(13): 346-351

紫化茶的化学成分及功能活性研究进展

Research progress of chemical constituents and functional activity in purple tea

食品工业科技. 2017(21): 302-306



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹亚楠, 向月, 杨斯惠, 等. 杂粮芽苗菜的营养与功能研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 433–446. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080290

CAO Yanan, XIANG Yue, YANG Sihui, et al. Research Progress on Nutrition and Function of Coarse Grain Sprouts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 433–446. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080290

· 专题综述 ·

杂粮芽苗菜的营养与功能研究进展

曹亚楠^{1,2}, 向月^{1,2}, 杨斯惠^{1,2}, 任远航^{1,2}, 邹亮^{1,2}, 赵钢^{1,2}, 彭镰心^{1,2,*}

(1. 成都大学食品与生物工程学院, 农业农村部杂粮加工重点实验室, 四川成都 610106;

2. 四川省杂粮产业化工程技术研究中心, 四川成都 610106)

摘要: 杂粮是膳食结构的重要组成部分, 但适口性与加工特性差等问题制约了杂粮产业的进一步发展。杂粮发芽后其营养物质与功能活性成分得到增强, 口感与加工特性发生变化, 是一种具有巨大开发潜力的新型食品原料。不同种类杂粮芽菜为消费者提供了多元化的选择, 然而其营养与功能成分差异及活性缺乏系统分析。本文比较了不同种类杂粮芽菜的营养成分、功能成分含量, 阐述了杂粮芽菜及其制品的降脂、降糖及抗炎等作用, 同时阐述了杂粮芽菜的生产工艺与品质提升方法, 为改善人们饮食结构和杂粮芽菜的进一步开发与利用提供参考与思路。

关键词: 杂粮芽菜, 营养成分, 功能活性, 生产工艺, 优质食品

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)18-0433-14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080290

本文网刊:



Research Progress on Nutrition and Function of Coarse Grain Sprouts

CAO Yanan^{1,2}, XIANG Yue^{1,2}, YANG Sihui^{1,2}, REN Yuanhang^{1,2}, ZOU Liang^{1,2}, ZHAO Gang^{1,2},
PENG Lianxin^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Coarse Cereal Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, School of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. Sichuan Engineering & Technology Research Center of Coarse Cereal Industrialization, Chengdu 610106, China)

Abstract: Coarse grain is an important part of dietary structure, but the poor palatability and processing characteristics restrict the further development of coarse grain industry. After germination, its nutrients and functional active components are enhanced, and its taste and processing characteristics are changed. It is a new food raw material with great development potential. Different kinds of coarse grain sprouts provide consumers with diversified choices, but their nutritional function differences are lack of systematic analysis. This paper compares the contents of nutritional components and functional components of different kinds of coarse grain sprouts, expounds the lipid-lowering, hypoglycemic and anti-inflammatory effects of coarse grain sprouts and their products, and expounds the production technology and quality improvement methods of coarse grain sprouts, so as to provide reference and ideas for improving people's dietary structure and the further development and utilization of coarse grain sprouts.

Key words: coarse grain sprouts; nutritional composition; functional activity; production technology; high quality food

杂粮是指除水稻、小麦、大豆、玉米和薯类作物以外的粮谷类作物。谷类杂粮主要包括大麦、小米、青稞、高粱、燕麦、荞麦、糜子等; 豆类杂粮主要有绿豆、芸豆、蚕豆、豌豆等, 其种类繁多, 且含有丰富的营养物质及功能性成分^[1]。随着社会的快速发展以

及人们日益改善的生活质量, 大家越来越关注食物营养和身体健康。杂粮中含有多种活性成分广受人们的喜爱, 其在日常饮食中的占比逐渐增加。传统的杂粮的加工方式不仅会损失杂粮的活性成分, 而且会影响其口感, 从而制约其产业发展^[2]。芽苗菜的生产过

收稿日期: 2021-08-26

基金项目: 成都市科学技术局重点研发支撑计划 (2022-YF05-00431-SN); 四川省科技创新苗子工程培育项目 (2021076); 国家重点研发计划项目 (2020YFD1001403); 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-08-02A)。

作者简介: 曹亚楠 (1993-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向: 杂粮精深加工与功效评价, E-mail: 1015880420@qq.com。

* 通信作者: 彭镰心 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 杂粮精深加工与功效评价, E-mail: penglianxin@cdu.edu.cn。

程大部分采用水培的方式,基本不使用农药、化肥,被大家称之为绿色无污染、食用安全的新型蔬菜^[3]。近年来利用萌发技术生产的芽苗菜品质柔嫩、生长周期短、不受季节限制,并且营养价值大幅提高,具有潜在的膳食价值,为开拓新型原料提供了可能。由于各种杂粮遗传特性差异,以及发芽后营养成分的改变,杂粮芽菜通过合理加工可满足不同人群的营养需求。有研究表明,苦荞种子经一定条件萌发出芽苗菜后,黄酮类物质含量显著增加,胰蛋白酶抑制剂活性和芦丁降解酶活性降低甚至消失,拥有更均衡的蛋白质与氨基酸比例,萌发后的苦荞种子营养更为丰富^[4]。因此,采用萌发技术,加工生产杂粮芽苗菜能有效提高杂粮中各种营养与功能成分,能有效增加杂粮产品的市场竞争力并创造大量的经济效益。

本文对不同种类的杂粮芽苗菜的营养成分与功能成分,杂粮芽苗菜及其制品的降脂、降糖与抗炎等活性研究,以及芽苗菜的生产工艺研究等进行总结,便于人们了解和掌握杂粮芽苗菜的生产工艺、营养成分与保健作用,为人们食用杂粮芽苗菜食品提供科学依据,同时为加工企业开发杂粮新产品提供参考。

1 杂粮芽苗菜基本营养成分

杂粮芽苗菜是以杂粮为原料,经合适工艺处理,发芽至一定芽长,使杂粮中部分大分子物质分解成小分子物质、矿物质等营养素释放,可改善食物的感官性能和风味,丰富和提高食物中功能性成分的种类及含量,在一定程度上提高杂粮的营养价值^[5]。发芽不仅可提高有益物质含量,比如一些谷物中限制氨基酸和维生素等,还可降低甚至消除一些有毒、有害或抗营养物质的含量,另外还可提高蛋白质和淀粉的消化率^[6]。

1.1 蛋白质

蛋白质是生命的主要物质基础之一,杂粮芽苗菜的品质也受蛋白质含量与组成的影响。

荞麦是我国主要的杂粮作物之一,由于其内部的抗营养因子及过敏原的存在而使荞麦蛋白的利用受到限制。有研究表明,苦荞种子经一定条件萌发出芽苗菜后,胰蛋白酶抑制剂活性和芦丁降解酶活性降低甚至消失,拥有更均衡的蛋白质与氨基酸比例,其营养更为丰富^[4]。秦萍^[7]研究发现红豆、薏米和燕麦发芽后可溶性蛋白的含量分别增加了 1.3、2.02 和 2.13 倍。鹰嘴豆富含多种蛋白质和氨基酸,是植物蛋白质的重要来源之一^[8]。肖俊松等^[9]研究发现鹰嘴豆在 22 ℃ 恒温发芽过程中,蛋白质含量由初始的 20.92% 增至 6 d 时的 25.71%,鹰嘴豆发芽是提高蛋白质含量及其利用率的有效方法。对于素食主义者和贫穷地区的人们,鹰嘴豆芽苗菜是摄取蛋白质的一个便宜、高效且健康的选择。

氨基酸是构成蛋白质的基本单位,赋予蛋白质特定的分子结构形态,使它的分子具有生化活性。Wongsiri 等^[10]研究发现在种子萌发过程中,某些必

需氨基酸如亮氨酸、苯丙氨酸和苏氨酸随萌发期的延长而显著增加,而半胱氨酸、蛋氨酸和赖氨酸的含量随萌发时间的延长而降低。Kim 等^[11]研究发现荞麦芽中总氨基酸含量高于荞麦籽粒,其含量为 28%~38%,且其中 14 种氨基酸含量明显提高。另外,荞麦芽中还含有大量的赖氨酸和功能性氨基酸(赖氨酸、 γ -氨基丁酸、胱氨酸和蛋氨酸)。荞麦发芽后总游离氨基酸含量提高为荞麦籽粒的 4 倍,其主要原因为氨基酸数量和质量的提高。几种常见杂粮芽苗菜氨基酸含量如表 1 所示。由表 1 可知荞麦芽苗菜必需氨基酸苏氨酸、赖氨酸、亮氨酸含量最高,而芸豆芽苗菜中精氨酸含量最高,精氨酸是身体功能和愈合的基本要素,可以帮助改善免疫系统健康和抵御疾病。另外杂粮芽苗菜氨基酸组成中谷氨酸占比较大,谷氨酸在生物体内的蛋白质代谢过程中占重要地位,参与动物、植物和微生物中的许多重要化学反应。

1.2 脂肪

种子萌发过程中脂肪含量通常会出现下降趋势,其主要原因是脂肪首先被脂肪水解酶水解,生成甘油和脂肪酸,脂肪酸经过一系列反应转化为蔗糖,并将其输送到生长部位,甘油迅速磷酸化转化成丙酮酸,进入三羧酸循环,这些途径也为种子萌发提供大量的生物能量^[19]。芸豆萌发过程中脂肪含量发生明显变化,萌发前脂肪含量为 1.7978%,浸泡 12 h 后,脂肪含量下降为 1.3984%,说明在萌发过程中脂肪被分解利用,但当萌发芽长达到 0.51~1.00 cm 时,脂肪含量增加为 1.5281%,其主要原因为芸豆萌发促进了酶活性增加,淀粉在酶作用下被水解成葡萄糖,葡萄糖经一系列反应生成乙酰辅酶 A,为脂肪合成提供糖源,促进了脂肪的合成^[19]。绿豆在发芽过程中脂肪含量出现先增后减的现象,这说明在发芽途中有脂肪被合成,原因是绿豆种子含有丰富的淀粉,发芽过程中会将其分解产生大量的糖原,促使了新的脂肪合成^[20]。

种子萌发过程中脂肪酸含量变化明显,其原因为脂肪在酶的作用下水解成甘油和脂肪酸。不饱和脂肪酸是构成体内脂肪的一种脂肪酸,人体必需的脂肪酸。本文汇总了几种常见杂粮芽苗菜不同脂肪酸的比例(表 2 所示),由表 2 可知荞麦芽苗菜和藜麦芽苗菜中脂肪含有种脂肪酸,其中最多的是油酸和亚油酸,两者共占脂肪酸的 75% 以上;大麦芽苗菜中亚油酸比例最高,约占脂肪酸的 60%;绿豆芽苗菜中亚麻酸比例最高,约占脂肪酸的 20%。芸豆萌发前,含量最为丰富的是油酸(18.43%)和亚油酸(42.75%),其均为不饱和脂肪酸,但随着芸豆萌发,不饱和脂肪酸含量发生明显变化,硬脂酸、油酸含量呈减少趋势,棕榈酸、亚油酸、亚麻酸含量呈增加趋势,含量最为丰富的为亚油酸(46.06%)和亚麻酸(17.84%)^[19]。油酸、亚油酸和亚麻酸是人体的必需脂肪酸,因人体不能合成,所以必须从膳食中补充,其是营养学公认的对人体具有重要作用的脂肪酸。综上所述萌发后

表 1 几种常见杂粮芽苗菜氨基酸含量
Table 1 Amino acid content of several common cereals and sprouts

名称	发芽条件	苏氨酸	半胱氨酸	蛋氨酸	缬氨酸	缬氨酸	亮氨酸	亮氨酸	酪氨酸	苯丙氨酸	赖氨酸	色氨酸	天冬氨酸	丝氨酸	谷氨酸	脯氨酸	甘氨酸	丙氨酸	组氨酸	精氨酸
荞麦芽苗菜 ^[12] (mg/g蛋白)	晒种2 d, 自来水中浸泡12 h后, 播种, 25 d采样	36.32	16.79	53.74	47.72	66.62	62.14	75.36	10.49	78.44	37.09	140.9	36.46	46.25	44.78	34.01	10.49			
藜麦芽苗菜 ^[13] (mg/g)	用0.1%次氯酸钠溶液浸泡20 min后 清洗。24 ℃下萌芽, 每隔6 h淋水及 臭氧杀菌处理, 萌发72 h	6.5	1.7	1.6	8.4	6.8	11.9	4.6	7.2	11.4	—	14	7.1	23.5	5.5	8.2	7.8	4.7	11.4	
大麦芽苗菜 ^[14] (mg/g)	用0.05%次氯酸钠浸泡30 min后清 洗。室温下温水浸泡8~10 h。25 ℃	0.363	0.2055	0.1785	0.554	0.447	0.792	0.283	0.556	0.341	—	0.832	0.3565	1.4895	0.9615	0.4625	0.55	0.2615	0.518	
绿豆芽苗菜 ^[15] (mg/g)	发芽5 d 采用DY801型豆芽机发芽48 h	1.98	0.28	0.64	3.07	2.56	4.97	1.85	3.77	4.32	—	5.06	3.04	5.76	3.79	2.03	2.59	1.89	5.18	
芸豆芽苗菜 ^[16] (mg/g)	0.7%的次氯酸钠浸泡30 min后清 洗, 去离子水浸泡5 h, 95%湿度, 25 ℃暗发芽4 d	12.8	2.1	3.1	15.4	14.1	27.3	9.1	12.5	19.7	3.8	37.2	18.4	45	9.9	11.1	12.5	9.1	19.7	
豌豆芽苗菜 ^[17] (mg/g)	10%的高锰酸钾浸泡15 min后清洗, 在20~28 ℃的恒温培养箱中避光催 芽至芽苗12~15 cm	0.87	0.35	—	1.44	0.91	1.92	1.552	0.528	1.32	0.65	2.96	0.71	2.9	0.48	1.03	1.3	0.48	1.26	
糜子芽苗菜 ^[18] (mg/g)	0.5%的次氯酸钠溶液消毒30 min清 洗, 在30 ℃恒温培养箱中培养48 h	10.59	—	—	23.36	18.09	50.15	8.08	19.71	11	—	32.11	25.39	96.73	27.81	12.51	40.92	7.22	15.9	

注: —表示没有做此项研究。

的杂粮芽苗菜含有较高比例的必需脂肪酸,可以作为良好的补充品。

1.3 糖类

发芽杂粮中多糖含量丰富,并且多糖结构差异较大,因此发芽杂粮多糖具有多种生物活性,如抗氧化、抗肿瘤和抗病毒等。徐磊^[23]研究发现,薏米在发芽过程中其果糖含量显著下降,麦芽糖和葡萄糖含量均大幅度提高,且具有高效的抗氧化活性。潘姝璇等^[24]研究发现,利用微波辅助法提取的发芽糙米多糖具有较高的抗氧化活性,其中羟自由基清除率最高为88.41%。

淀粉在酶的作用下可发生降解转化为葡萄糖,而种子萌发过程中淀粉酶的活性得以明显提升,因此萌发可使淀粉降解为植物提供碳源和能源。萌发虽加快了淀粉的降解,改变了淀粉的特性,但食品加工也因淀粉结构与组成的变化而受到相应的影响。张俊等^[25]研究发现高粱发芽后淀粉酶活力显著上升,在一定程度上改善了高粱粉的理化及功能特性;发芽还提高了高粱粉的稳定性和结晶度,提高了热(冷)糊稳定性,改善了乳化稳定性及泡沫稳定性。杨春等^[26]发现黑苦荞发芽10 h后直链淀粉发生明显变化,其含量和透明率均增加,并且淀粉峰值黏度提高1.1倍。Shekib^[27]通过研究发现,萌发可明显提高蚕豆、芸豆、鹰嘴豆的淀粉消化率。因此发芽可改善杂粮中糖类物质的含量、功能和物理特性。

1.4 膳食纤维

芽苗菜中的膳食纤维含量与茄果类蔬菜相比比较高,但与叶菜类的蔬菜相比略低或相接近。膳食纤维的生理功能不仅与其含量有关,而且与不溶性膳食纤维和可溶性膳食纤维的组成也密切相关。不溶性膳食纤维可促进人体肠道蠕动、降低食物在肠胃中存在的时间;膳食纤维素中的部分成分可与胆固醇融合,木质纤维素可与胆酸融合排出体外,从而减少胆固醇,防止冠心病^[28]。黄凯丰等^[29]发现荞麦苗膳食纤维含量达545.9 mg/g,远高于黄豆芽等常见芽苗类蔬菜,且以不溶性膳食纤维为主,占总膳食纤维的

88.3%,说明荞麦苗在防便秘等方面具有良好的潜力。蒋芮等^[30]研究发现黑大麦发芽后可溶性膳食纤维含量显著降低,不溶性膳食纤维增加,总膳食纤维含量减少($P<0.05$)。这可能是由于发芽过程中半纤维素酶的作用,使得黑大麦中的半纤维素分解成糖类,从而使得膳食纤维含量降低。周小理等^[31]研究发现糙米发芽前后膳食纤维含量发生明显变化,生理活性也得到较大提升,其中不溶性膳食纤维含量下降,可溶性膳食纤维含量则明显增加,更适宜于人体的消化吸收。因此,可根据不同杂粮芽苗菜中膳食纤维的特点,开发差异化的杂粮产品。

1.5 矿物质

矿物元素是构成人体组织的重要物质,对于维护人体机能具有重要的作用。在发芽过程中矿物元素(铁、铜、锰、镁、锌)含量略有增加,这与发芽过程中形成了新的组织,矿物元素发生转移有关,同时干物质也有所损失。Bohn等^[32]研究发现,谷物发芽能够提高谷物中矿物质元素的生物有效性,原因为发芽过程中植酸被分解。有研究表明黑米发芽后 γ -氨基丁酸和矿物质的含量均略有提高^[33]。蒋芮等^[30]研究发现黑大麦发芽过程中钙、铁和锰元素分别是未发芽黑大麦的1.276、1.386和1.527倍($P<0.05$),提高了其营养价值。

微量元素是动植物生命活动中不可缺少的,对其生理生化的代谢活动具有重要的作用。在植物性食品中,锌的生物利用率主要受到植酸的影响,植酸/锌摩尔比是评价锌生物利用率的重要指标。刘金芳等^[34]研究发现豇豆发芽4 d时,其植酸/锌摩尔比达最低,能有效提高Zn的生物利用度。谷物中微量元素在无机盐状态下吸收率较低,因其一般结合于不可消化纤维、植酸和丹宁酸,当其与有机物键合或相互整合,其在人体内的吸收率则明显提高。Lintschinger等^[35]研究发现,在润湿荞麦籽粒萌芽过程中,若加入微量元素离子,如Li、V、Cr、Fe、Mn、Co、Cu、Zn、Sr、Mo、As和Se等,经过萌芽第一天滞后期后,微量元素可大量吸收,与氨基酸、糖等相互螯合,转变

表2 几种常见杂粮芽苗菜不同脂肪酸的比例(%)

Table 2 Proportion of different common fatty acids and sprouts of different fatty acids (%)

名称	发芽条件	肉豆蔻酸	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	二十碳烯酸	芥子酸
荞麦芽苗菜 ^[12]	晒种2 d、自来水中浸泡12 h后,播种,25 d采样	0.39	5.81	2.51	47.5	39.48	4.29	-	-
藜麦芽苗菜 ^[21]	0.3%次氯酸钠洗涤15 min,再用蒸馏水漂洗。然后种子在大约45%的湿度下进行调节和湿润处理。在黑暗条件下,在孵化器实验室培养箱中,在黑暗中进行48 h发芽	-	10.02	-	23.83	53.02	8.33	1.27	1.10
大麦芽苗菜 ^[22]	20 h的间断浸渍发芽过程持续4 d	-	18.42~19.48	1.03~1.30	12.93~13.97	56.09~58.13	7.95~8.55	-	-
绿豆芽苗菜 ^[20]	0.03%~0.05%次氯酸钠溶液浸泡0.5 h消毒,然后在去离子水中(W/V1:3~1:5)25℃下浸泡过夜(12 h),在室温(23~25℃)下发芽5 d	-	32.7	5.21	4.99	36.33	20.77	-	-
芸豆芽苗菜 ^[19]	洗净后用0.5%次氯酸钠浸泡5 min,进行杀菌处理,用蒸馏水浸泡12 h(无光照)。将浸泡后的芸豆放置在发芽盘中室温下进行萌发处理(无光照),每天淋水3次,萌发至芽长大于3.51 cm	-	12.87	1.65	16.74	46.06	17.84	-	-

注:-表示没有做此项研究。

为人体易吸收形式;当萌芽培养液中 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 浓度分别为 50、50 和 25 mg/L 时,在荞麦籽粒萌芽第四天 Zn^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Cu^{2+} 吸收率分别为 83%、69% 和 85%。

1.6 维生素

维生素是在植物体内广泛存在的一种有机化合物,是人体所需营养成分,需通过饮食获取。经研究发现,种子中维生素 B、维生素 C 和维生素 E 通过萌发可显著增加。有研究发现荞麦萌发过程中, $\text{V}_{\text{B1}}+\text{V}_{\text{B6}}$ 含量在第 7 d 可达荞麦籽粒含量 27 倍 (11.8 mg/100 g), V_{C} 含量第 7 d 达荞麦籽粒 160 倍 (1715 mg/100 g)^[36]。维生素 E 是主要的天然抗氧化剂之一,具有抗炎,改善脂质代谢,提高细胞免疫力以及抗衰老等生理功能。张琴萍^[37] 研究发现藜麦芽苗中含有维生素 E,其主要是 α -生育酚,其含量在 3.88~21.64 mg/100 g。叶酸是机体细胞生长和繁殖所必需的物质,有研究发现绿豆芽中叶酸含量远高于绿豆本身^[38]。

综上可知杂粮发芽前后营养物质有较大差异,本文汇总了几种常见杂粮芽苗菜的基础营养成分如表 3 所示。由表 3 可知,不同杂粮芽苗菜中营养成分相差较大,其中豌豆芽苗菜中 V_{C} 含量最高,适合免疫力低下人群补充食用。荞麦芽苗菜中黄酮含量

达 48.59 mg/g,可作为心血管疾病人群的重要食用原料。绿豆芽中蛋白含量最高,可用于补充能量类食品的研制原料。

2 杂粮芽苗菜功能成分

随着种子萌芽,激发了多种物质发生变化,例如酶活性增强,活性物质增加,机体代谢水平提升,另外,还促使包括多酚在内的次级代谢产物大量生成,从而提高了植物本身的药理活性^[51]。

2.1 酚类物质

酚类物质是植物的主要次生代谢产物之一,广泛分布于蔬菜、水果、谷物、豆类和果仁等各种高等植物器官中,主要由酚酸、类黄酮和单宁三类物质构成,对植物的品质、色泽、风味等有一定的影响,同时还具有抗氧化、抗癌、抗逆等重要的作用^[52]。杂粮中含有丰富的酚类化合物,其具有较高的抗氧化活性。杂粮发芽后,其酚类含量和种类发生改变。Garzón 等^[53] 研究发现,高粱在萌芽时酚类物质发生明显变化,在 25 ℃ 萌发 3 d 时总酚类物质含量和抗氧化活性最高。Ti 等^[54] 研究发现,发芽糙米的总酚类物质比发芽之前提高了 63.2%,结合酚类减少了 4.7%,抗氧化活性明显提高。

酚酸在植物中普遍存在,是一类重要的酚类物质,且具有显著的抗氧化活性。Kima 等^[55] 发现荞麦

表 3 几种常见杂粮芽苗菜的基础营养成分
Table 3 Basic nutrients of several common cereal sprouts

名称	发芽条件	蛋白 (mg·g ⁻¹)	还原糖 (%)	总膳食纤维 (mg·g ⁻¹)	淀粉 (%)	V_{C} (mg/100 g)	叶绿素 (mg·g ⁻¹)	黄酮 (mg·g ⁻¹)	γ -氨基丁酸 (mg·g ⁻¹)
荞麦芽苗菜	盐水选种,清洗,浸种,23 ℃催芽至2 mm播种,25 ℃培育18 d ^[29]	488.5	2.48	545.9	11.39	—	—	48.591	—
荞麦芽苗菜	浸种24 h,1%的NaClO溶液浸5 min,28 ℃富硒(20 μg/L)培养48 h ^[39]	—	0.3	—	30.77	10	—	3	—
荞麦芽苗菜	0.2% KMnO ₄ 消毒15 min,清洗,置于光照培养箱(光照强度800 lx)内30 ℃萌发7 d ^[40]	—	—	—	—	10.19±0.93	—	3.85±0.87	—
藜麦芽苗菜	拣种除杂,清洗浸泡2 h,置于22 ℃培养箱中萌发4 d ^[41]	209.7	10.75	—	51.5	—	—	1.29	0.55
藜麦芽苗菜	30~35 ℃浸种6~8 h,播种,苗高15 cm采收 ^[42]	—	—	—	—	29.2	—	12.41	—
大麦芽苗菜	0.001 g/mL次氯酸钠溶液杀菌30 s,无菌水清洗3次,浸泡8 h、15 ℃发芽48 h ^[30]	130.5	≈7.5	—	39.42	—	—	—	—
大麦芽苗菜	发芽20 d ^[43]	—	—	—	—	303	0.8	—	—
大麦芽苗菜	灭菌水浸泡24 h,30 ℃培育8 d ^[44]	—	—	—	—	—	—	2.25	0.56
绿豆芽苗菜	盐水选种,清洗,浸种,23 ℃催芽至2 mm播种,25 ℃培育18 d ^[29]	495.6	2.53	413.9	15.74	—	—	0.055	—
绿豆芽苗菜	选种,清水浸泡,23 ℃发芽至4 cm ^[45]	—	—	—	—	21.55	—	—	—
绿豆芽苗菜	清洗浸泡12 h,20 ℃发芽168 h ^[46]	55	—	—	—	—	—	2.5 ^[46]	—
芸豆芽苗菜	选种,洗净后用0.5%次氯酸钠浸泡5 min,去离子水反复冲洗,用蒸馏水浸泡12 h(无光照),室温下萌发至芽长大于3.51 cm ^[19]	150.0	2.5155	—	42.47	27.63	—	—	—
芸豆芽苗菜	温水浸泡,25 ℃生化培养箱保湿催芽5 d ^[47]	—	—	—	—	—	—	3.8 ^[47]	—
豌豆芽苗菜	10%的高锰酸钾浸泡15 min,清洗浸种15~20 h,20~28 ℃的恒温培养芽苗长至12~15cm ^[17]	343.6	6.6	139	—	0.032 μmol/g FW	0.167mg/L	—	—
豌豆芽苗菜	清洗除杂,水浸泡12 h,23 ℃发芽10 d ^[48]	—	—	—	5.9	4.4049	—	—	—
豌豆芽苗菜	清洗,55 ℃温水中浸种20 min,之后清水中浸泡24 h,白天20~25 ℃,夜晚18~22 ℃,LED蓝光下培育6 d ^[49]	—	—	—	—	1500	1.33	—	—
豌豆芽苗菜	无菌水浸种12 h,清洗,26 ℃条件下避光培养。待豌豆发芽长至2~3 cm,白天26 ℃夜晚22 ℃处理5 d ^[50]	—	—	—	—	—	—	3.8	—

注:—表示没有做此项研究。

芽比荞麦籽粒含有更高含量的绿原酸, 荭草素和异荭草素, 另外, 萌发过程中出现了 3,4-二羟基苯甲酸和丁香酸。Hidalgo 等^[56]研究发现, 发芽大麦富含阿魏酸(187 mg/kg)、水杨酸(113.9 mg/kg)、香草酸(47.3 mg/kg)等酚类物质。芸豆本身就含有丰富的多酚类物质, 且具有较高的抗氧化及抗癌活性, 其芽苗菜中多酚类物质的含量接近芸豆的 5 倍, 是植物来源中人们摄取酚类化合物的重要来源之一^[57]。

生物类黄酮是天然的抗氧化剂, 也是一些杂粮植物中重要的生理活性物质, 具有降脂、抗氧化、抗菌、消炎的作用。芦丁具有较多的生理功能, 但其极易被降解, 而萌发可降低芦丁降解酶的活性, 促使芦丁含量显著增加。有研究发现荞麦籽粒在萌发过程中黄酮类物质变化显著, 甚至增加数十倍, 萌发第 7 d 时芦丁和槲皮素含量达到荞麦籽粒的 35、65 倍^[58]。Kim 等^[59]研究发现苦荞萌发为芽苗菜后, 活性成分的种类与数量发生明显变化, 明显提升了其营养价值, 其中包括多种酚酸、花青素、黄酮、黄酮醇、烟酰胺和类胡萝卜素等生物活性成分。除了内部丰富的功能成分可提升其市场价值, 食物的视觉感官直接或间接影响其经济效益, 苦荞芽苗菜中的花青素是其显示红色的主要原因, 适宜条件的光照可有效提升芽苗菜中花青素的合成与积累^[60]。

李丽等^[61]研究发现赤小豆在萌芽后抗氧化能力明显提升, 在第 5 d 时达到最高, 并且进一步研究发现发挥抗氧化作用的主要为 4 种酚酸和 7 种黄酮类成分。Guo 等^[62]研究表明, 绿豆萌芽成芽苗菜后, 其总酚和黄酮含量显著提高, 分别为绿豆种子中的 4.5 和 6.8 倍。Pradeep 等^[63]发现细柄黍发芽后, 其总黄酮、总酚和单宁含量显著升高, 抗氧化能力也随之提升。郑璐等^[64]研究发现糜子发芽后, 生物活性物质含量明显提高, 其中游离酚、总酚、游离黄酮、总黄酮及相应抗氧化能力显著($P<0.05$)高于籽粒。

2.2 手性肌醇

D-手性肌醇(D-chiro-inositol, DCI)是肌醇九种异构体中具有旋光性的一种。近年来人们研究发现 DCI 除了具有肌醇促进肝脏脂代谢功能外, 还具有如胰岛素增敏作用, 降血糖, 改善多囊卵巢综合征(PCOS)患者的排卵情况, 以及抗氧化、抗衰老、抗炎特殊的生理功能。DCI 主要存在于荞麦和大豆等植物中, 如果人体缺乏将会产生胰岛素抵抗现象。目前对 DCI 的研究主要集中在 DCI 作用于动物的机理研究, 而对如何提高植物中 DCI 的研究较少。已有研究表明其游离形式能够降低肥胖恒河猴的血糖^[65]。研究发现在荞麦中大多数 DCI 以荞麦酚的形式存在, 但是在荞麦发芽期间转为游离形式^[66-68]。另外, 宋雨等^[69]研究发现发芽能有效提高苦荞种子中 D-手性肌醇的含量。卢丞文等^[70]优化了 DCI 提取条件, 荞麦籽粒经萌芽后, DCI 单体含量提高约 8 倍。因此, 荞麦萌芽后不仅 DCI 含量提升, 其存在形

式更利于降低血糖。

2.3 γ -氨基丁酸

γ -氨基丁酸(GABA)是一种新型功能性因子, 具有多种生理功能, 例如降血压、促进睡眠、增强记忆力、抗焦虑、改善脑机能等^[71]。在植物体内, GABA 能调控植物的生长发育, 保证碳源与氮源的稳定, 发芽过程中发生富集。Zhang 等^[72]研究发现糙米发芽可生成 GABA, 含量可达 1.4 g/kg。黄金等^[13]研究发现藜麦发芽后 GABA 含量显著增加, 达到藜麦籽粒的 3.4 倍, 185.6 mg/100 g。Sharma 等^[73]研究发现稗子发芽后 GABA 的含量可提高 12.34%, 此时含量可达 35.70 mg/100 g。Oh 等^[74]研究表明发芽导致 GABA 含量增加的主要原因是在萌发过程中谷氨酸转化形成的, 并且发芽过程中氨基酸转移酶活性增强。胡洁^[41]发现藜麦萌发过程中蛋白质在蛋白酶的作用下水解, 增加了 GABA 前体物质谷氨酸含量, 使得 GABA 含量在藜麦萌发过程逐渐增加。

综上所述, 杂粮萌芽激发了多种物质发生变化, 例如, 萌芽改善生物活性物质种类与数量, 提高抗氧化活性, 促使 D-手性肌醇转换为利于降血糖的游离形式, 富集具有多种生理功能的 γ -氨基丁酸, 从而提高了杂粮芽菜的市场利用价值。

3 杂粮芽菜生理功能

《本草纲目》记载: (芽菜)“能快胃开脾, 下气和中, 消食化积”。种子发芽过程可富集 γ -氨基丁酸(GABA), 其是人脑组织中最重要神经递质之一, 另外, 芽菜还富含酚类、维生素、花青素等抗氧化物质, 赋予其降血糖、降血脂、降血压、抗氧化、抗炎等药理作用, 可为人类正常生理活动提供支持^[75]。

3.1 降血糖、降血脂功能

糖尿病是严重危害人类健康的最主要慢性非感染性疾病之一^[76], 虽然有不同的降血糖药物, 但其不仅会导致糖尿病并发症^[77], 还存在一些副作用, 例如充血性心力衰竭、贫血以及严重的低血糖^[78], 且对人体存在潜在威胁, 因此饮食疗法越来越受到人们的关注。杂粮芽苗菜中富含黄酮、手性肌醇、 γ -氨基丁酸等多种功能成分, 具有改善血糖和血脂的作用。Peng 等^[79]研究发现苦荞芽中含有丰富的多酚、异黄酮和 L-抗坏血酸, 具有清除自由基与降血脂作用。Lee 等^[80]研究发现给糖尿病小鼠注射芦丁或苦荞芽乙醇提取物均能显著降低血糖水平。Watanabe 等^[81]研究表明, 荞麦芽主要通过促进胆汁酸的合成和排泄对 2 型糖尿病小鼠发挥明显的降血脂作用。Mohamed 等^[82]研究发现口服胡芦巴芽汁、大麦芽汁、无细胞益生菌提取物、乳清蛋白水解物及其混合物对高血糖及相关疾病有良好的治疗作用。徐磊^[23]研究发现薏米发芽后其降脂与抗氧化作用明显高于薏米种子, 不仅防止高脂血症诱发的肝损伤, 还可防止肝脏脂肪病变。因此, 杂粮芽苗菜对改善血糖血脂具有潜在的利用价值。

3.2 降血压功能

由流行病学研究报告可知,一些食物,特别是富含多酚类的食物,可以降低心血管风险和代谢紊乱,如高血压。Nakamura 等^[83]以荞麦芽为原料,经乳酸发酵生产出一种实用的抗高血压食品新发酵荞麦芽(neo-FBS)。研究发现 neo-FBS 制剂的收率是常规制剂的 12.7 倍,降血压效果是常规制剂的 10 倍。Merendino 等^[84]以苦荞干芽为原料,经研磨后制成粉体制作含 30% 苦荞干芽和 70% 硬粒小麦粗粉的面食。研究结果表明苦荞芽面的总酚含量和抗氧化活性均高于硬粒小麦粉面团,自发性高血压大鼠灌胃苦荞芽面食后,血浆内源性血管舒张剂缓激肽(BK)和一氧化氮(NO)水平升高,血管收缩剂内皮素-1(ET-1)水平降低,抗氧化能力增强,表明苦荞芽面食可能有助于降低体内高血压和氧化应激。Choi 等^[85]研究表明,发芽糙米对高血压大鼠具有降血压和降低血脂的作用。杂粮含有丰富的多酚类物质,且发芽促使包括多酚在内的次级代谢产物大量产生,另外,其相关产品均有助于降低体内高血压。

3.3 抗氧化作用

谷物发芽后具有较高的抗氧化活性,其主要原因是发芽过程中酚类、多糖和维生素等营养成分含量增加。植物来源的酚类化合物结构中含有较多的羟基,因此表现出较强的抗氧化作用,并可通过信号转导途径调控机体氧化酶基因表达^[86]。Cáceres 等^[87]研究发现 34 ℃,发芽 96 h 的发芽糙米具有最高的抗氧化活性。Hidalgo 等^[88]研究表明,大麦发芽后总酚含量显著增加,且加入 10% 左右的发芽大麦粉所制成的饼干具有良好的抗氧化性。白永亮等^[89]研究发现青稞种子经萌动处理后总酚、黄酮及 GABA 含量均得到提高,可增强抗氧化活性,其抗氧化活性最强的浸麦时间为浸麦萌动 6 h,最强的萌芽时间为萌芽萌动 8 h。王雪^[90]研究发现萌发过程显著提高了藜麦的抗氧化活性,因为多酚类化合物能转变为自由基的接受体,从而隔断自由基连锁反应从而达到抑制氧化的作用。郑璐等^[64]研究发现内糜 8 号发芽 6 d 后,总酚、总黄酮含量分别为发芽前的 5.9 和 1.9 倍,西农 10-04 号则分别为发芽前的 4.6 和 1.9 倍,抗氧化能力均显著增强($P<0.05$)。除酚类物质,多糖、维生素 C 和维生素 E 也具有较好的抗氧化性,能够清除人体内的自由基。张淑杰等^[91]研究发现豌豆芽苗菜多糖具有较强的抗氧化能力,不同萌发阶段其抗氧化能力表现出一定的规律性,说明萌发对多糖的抗氧化能力有显著影响。植物体内的自由基清除系统包括酶系统和非酶系统。非酶系统包括了细胞中的多种还原性物质如维生素 E、维生素 C 和类胡萝卜素等^[92]。张超等^[36]研究发现荞麦萌发过程中, V_C 含量第 7 d 达荞麦籽粒 160 倍(1715 mg/100 g)。张琴萍^[37]研究发现藜麦芽苗菜中含有维生素 E,其主要是 α -生育酚,其含量在 3.88~21.64 mg/100 g。综上所述,

杂粮发芽可明显提升其抗氧化活性。

3.4 抗炎作用

近年来研究发现炎症与多种疾病发生密切相关,杂粮在发芽过程中维生素、氨基酸和酚类物质等营养成分的增加,使其具有高效的抗炎作用,逐渐引起人们的关注。荞麦是体内外具有抗炎作用的生物活性成分的良好来源。Nam 等^[93]研究发现苦荞芽中芦丁含量较高,该提取物能显著降低多糖诱导的腹腔巨噬细胞产生细胞因子,结果表明苦荞芽提取物可能是影响巨噬细胞介导的炎症性疾病的抗炎药的潜在来源。Imam 等^[94]研究证实,蒸谷发芽糙米可以抑制小鼠肝脏炎症和纤维化,降低肝硬化和癌症的风险。Sakamoto 等^[95]研究发现,发芽糙米具有增强人体免疫功能。Giménez-Bastida 等^[96]使用不同消化的荞麦产物单独或与 TNF- α (20 ng/mL)联合处理细胞,观察其对细胞迁移、线粒体膜电位和细胞周期的影响,以及肠道炎症过程中的变化,结果表明整个荞麦产物减少了 TNF- α 对肌成纤维细胞迁移和细胞周期的影响,而与多酚含量无关,可以对炎症性肠病产生有益的影响。因此,杂粮芽苗菜也具有明显的抗炎作用,对炎症性肠病、肝硬化、癌症等疾病产生有益作用。

3.5 其他生理功能

发芽杂粮中含有 GABA、手性肌醇、黄酮等活性物质,对于保护神经,增强免疫功能,治疗和预防肿瘤具有重要的作用。Mamiya 等^[97]研究得出,膳食发芽糙米能发挥抗抑郁的作用,由于糙米发芽富集了 GABA。陈振等^[98]研究发现蚕豆发芽后左旋多巴含量明显增加,在萌发第 9 d 达到最大,左旋多巴在临床上用于治疗帕金森病。鹰嘴豆发芽可促使其异黄酮含量提升为 0.33%^[99],鹰嘴豆芽素 A 是一种异黄酮类化合物,能抑制肿瘤细胞的生长。以上研究内容表明杂粮芽在抗抑郁和抑制肿瘤生长等方面也发挥着重要作用。综上所述,杂粮芽苗菜及其产品在降血糖、降血脂、降血压、抗氧化、抗炎和增强免疫方面发挥着重要作用,其应用价值高、开发前景十分广阔。

4 杂粮芽苗菜品质提升方法

目前芽苗菜的主要栽培步骤为选种、浸种、催芽、叠盘、上架和采收,人们主要通过调节温度、湿度、光照处理和采收提高其品质。研究认为,选种、浸种时间、催芽温度、播种密度、光周期、采收时间等是影响芽苗菜产量和质量的关键因素^[3]。另外,在芽苗菜生产过程中,为了改善芽苗菜生长和提高芽苗菜品质,添加外源物质在芽苗菜生产中得到研究应用。

4.1 光照

植物生长发育很大程度上受到光的影响,直接影响着芽苗菜的营养品质。光环境调控在芽苗菜上的应用受到广泛关注与应用,因其避免了化学物质残留得风险,另外还可节约能源^[100]。Peng 等^[101]采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)和高效液相色谱

(HPLC)探讨了光照对苦荞芽生长、花青素含量及代谢产物浓度的影响。在光/暗条件下,3-O-葡萄糖苷和3-O-芸香苷的含量均高于在暗条件下。另外,不仅光/暗条件会影响芽苗菜的品质,不同颜色或者不同波长的光也同样影响其品质。Ji等^[102]研究发现蓝光照射后UV-C(BL+UV-C)处理的苦荞芽苗菜中总黄酮含量比对照(UV-C+BL)提高了10%。Liu等^[103]研究发现蓝光下豌豆芽的ABTS阳离子自由基清除能力、铁还原能力显著提升,酚类物质含量显著增加。Nam等^[104]研究发现在蓝光下生长的芽苗菜还表现出最高的总酚和总黄酮含量以及最高的抗氧化活性。王珺儒等^[105]研究发现光照条件下苦荞芽的生长受到抑制,其中抑制效果为蓝光>白光>红光;在蓝光条件下,苦荞芽中不仅芦丁、槲皮苷和槲皮素含量显著增加,同时其抗氧化活性有所提高;而通过红光和蓝光照射,可促使花青素的累积。雒晓鹏等^[106]研究发现采用紫外光、LED蓝光和LED红光照射的苦荞芽苗菜具有更诱人的外观,并且可促使黄酮的积累,使其具有更高的营养与经济价值。Tuan等^[107]发现在白光($1282.63\text{ }\mu\text{g}^{-1}$ 干重)下生长的芽苗菜中类胡萝卜素的积累量最大。Tsurunaga等^[108]研究发现UV-B>300 nm的照射增加了荞麦幼苗花青素和芦丁的含量,以及DPPH自由基清除活性,而在260~300 nm波长的UV-B光照射对荞麦幼苗的生长不利。由此可知不同颜色的光对芽苗菜起着不同的调节作用,不仅可提高黄酮类物质含量,同时还可提高其抗氧化活性,改善其外观。

在传统的绿色豆芽种植中,白光作为光源。近年来,一些研究发现,UV-A等短波长光有利于提高芽中黄酮类化合物的含量^[108]。有研究表明UV-A能显著提高豆芽的花青素含量。但UV-A会造成豆芽氧化损伤,降低下胚轴长度和产量,不利于豆芽的工业化生产。因此,在使用光源调控芽苗菜时需选用植物适合的光源,不仅要关注其品质,更不应忽视其产量。

4.2 温度

植物萌芽过程中,温度对营养成分的含量有较大影响。据报道,一些植物中花青素的生物合成可能受到低温胁迫的影响^[109]。Li等^[110]研究发现低温胁迫显著提高了苦荞芽花青素的合成和抗氧化活性,花色苷在荞麦芽的表皮细胞中积累,这种积累可能在抗寒性中发挥作用。陈进红等^[111]研究发现荞麦芽苗菜的芦丁含量受培养温度的影响,随培养温度的提高,芽菜的芦丁含量下降。曹菲菲等^[46]研究表明随着干豆的萌发,黄酮、V_C和抗氧化活性都有明显的增加;蛋白质含量逐渐减少;有机酸的含量变化不大;虽然低温萌发速度慢,但其各营养成分含量高,芽苗菜品质较高,高温萌发可能导致一些营养成分损失,因此较高温度不利于芽苗菜的生产。

4.3 添加外源物质

植物体内许多次生代谢物的生物合成通常是植

物对生物和非生物胁迫的防御反应,生物和非生物诱导子可以有效地刺激它们的积累,使诱导成为提高植物组织中生物活性次生代谢物产生的最有效策略之一。在以往的研究中,最常用和最有效的诱导子主要包括微生物细胞的成分,特别是多糖和低聚糖(生物)和重金属离子、紫外线辐射和高渗胁迫(非生物)以及植物防御反应中的信号分子,如水杨酸(SA)和茉莉酸甲酯(MJ)。

4.3.1 添加多糖或低聚糖 适当添加多糖或者低聚糖可有效刺激次级代谢物的生成,Zhao等^[112]报道酵母多糖(YPS)能有效刺激苦荞芽苗菜生长和黄酮类化合物的产生,且刺激效果呈浓度依赖性,还发现这些生物活性代谢物的积累是由YPS刺激苯丙酸途径引起的。Zhao等^[113]研究发现利用内生真菌作为诱导子,能有效地促进苦荞芽的生长和芦丁的生产,其主要原因为菌丝体多糖对苯丙酸途径的刺激。Jeong等^[114]研究发现蔗糖处理能改善荞麦芽的营养成分和抗氧化作用。Park等^[115]发现茉莉酸和壳聚糖处理能有效促进萌发荞麦中酚类物质的积累。因此,添加多糖或低聚糖可有效刺激黄酮类/酚类生物活性代谢物的积累,改善营养成分和抗氧化作用。

4.3.2 胁迫 适当的胁迫也能对芽苗菜体内某些营养成分进行富集。Lim等^[116]研究发现适当浓度的NaCl处理可以改善荞麦芽的营养品质,包括酚类化合物、类胡萝卜素和抗氧化活性的水平。3%蔗糖和7.5 mmol/L CaCl₂同时诱导荞麦芽能显著促进多酚、黄酮类化合物、 γ -氨基丁酸、维生素C和维生素E等生物活性物质的积累,但对芽的生长没有负面影响,促使荞麦芽具有潜在的营养价值和保健价值^[117]。适当盐胁迫(80 mmol/L)可通过提高可溶性蛋白等初生代谢产物及黄酮等次生代谢产物含量以促进荞麦芽品质的提高^[118]。据报道^[119],外源Ca²⁺处理可触发酚类代谢产物的生物合成,以及NaCl胁迫下大麦芽的相关酶活性。Micha^[120]通过诱导2日龄小扁豆芽苗菜产生氧化胁迫、渗透胁迫、离子渗透胁迫和温度胁迫,提高了芽苗菜的营养品质。适当的胁迫不仅不影响芽苗菜的生长,还可改善其品质。

4.3.3 茉莉酸甲酯 茉莉酸甲酯通过促进植物体内酚类化合物和生物碱的生物合成,对植物次生代谢有较强的影响。Kim等^[121]首次报道外源MJ能有效地促进苦荞麦芽中功能代谢物的积累,并成功地改善了其营养品质。Yang等^[122]研究发现茉莉酸甲酯处理使荞麦中总多酚和总黄酮含量增加约1.6倍,异香豆素、香豆素、芦丁和牡荆素含量增加约18%。

4.3.4 其它 除以上外源物质,Jia等^[123]研究发现H₂可以作为一种独特的生物活性分子提高植物对氧化胁迫的耐受性,能显著释放UV-A对豆芽下胚轴伸长的抑制作用,提高豆芽鲜重,有很强的抗氧化能力,富氢水(HRW)能明显减轻UV-A对豆芽的氧化损伤,提高豆芽中抗坏血酸(AsA)含量。

芽苗菜作为一种幼苗蔬菜,环境对其生长品质影响很大,生产上可利用光调控、温度、添加外源物质在短时间内改善芽苗菜的生长状况、富集矿质元素、增强芽苗菜的功能活性,从而提升芽苗菜品质。

5 结论与展望

随着居民健康意识的增强,人们对食物的需求已从传统的基本生活需求转向为对健康生态的追求,更加关注食物的品质及安全性。芽苗菜的生产模式与丰富的营养非常符合人们的消费需求,杂粮丰富的营养成分及功能成分越来越受人们的青睐。芽苗菜生产过程中,会伴随功能活性成分合成,有毒有害物质消失,另外也会有营养成分损失。例如在萌芽过程中,一些人体不易吸收的高分子贮藏的物质可转化为人体易吸收的可溶性小分子化合物。另外,活体芽苗菜较原料富集营养成分。如种子中不含 V_C ,而活体芽苗菜中却含有大量的 V_C ,可以提高人体免疫力,预防坏血病;活体芽苗菜还能生成大量易被人体吸收的活性植物蛋白,增加铁、铜、锰、镁、锌等矿物质含量。食用芽苗菜还可中和体内多余的酸,从而达到酸碱平衡,改善人体的精神状态。另外,因其还含有丰富的膳食纤维,活体芽苗菜能帮助胃肠蠕动,防止便秘;杂粮芽苗菜中含有丰富的活性成分,经常食用可以瘦身,降低血脂和血糖水平;每种杂粮功效不同,其芽苗菜也具有各自特色的营养保健功能。开发杂粮芽苗菜能够为人们提供更多元化的食物选择,有利于膳食平衡,具有十分广阔的应用前景。但发芽过程中也有不利的一面,例如一些营养成分含量会因发芽时间的延长而明显下降,这对发芽食品的营养价值也产生了一定的负面影响,同时,发芽过程也有可能产生有害成分。因此,应注意杂粮发芽过程中营养功能的变化,选择最适的发芽方法。

参考文献

- [1] 向月,曹亚楠,赵钢,等.杂粮营养功能与安全研究进展[J].食品工业科技,2021,42(14):362-370. [XIANG Y, CAO Y N, ZHAO G, et al. Advances in the nutritional function and safety of coarse cereals[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 362-370.]
- [2] 郭丽萍,朱英莲,唐娟.十字花科芽苗菜与成熟蔬菜生物活性成分的比较[J].营养学报,2017,39(6):588-593. [GUO L P, ZHU Y L, TANG J. Comparison of the bioactive compounds in cruciferous vegetables and their sprouts[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2017, 39(6): 588-593.]
- [3] 兰成云,王俊峰,孙杨,等.芽苗菜研究进展[J].安徽农业科学,2018,46(33):5-7. [LAN C Y, WANG J F, YANG S. Research progress of bud seedling vegetables in china[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(33): 5-7.]
- [4] 马麟,彭镡,赵钢.我国苦荞芽菜生产及其食品开发研究进展[J].农产品加工,2015(11):64-67,71. [MA L, PENG L, ZHAO G. Research progress in tatar buckwheat sprouts production and related food[J]. Farm Products Processing, 2015(11): 64-67,71.]
- [5] 马先红,刘景圣,陈翔宇,等.我国发芽粮食及食品应用研究最新进展[J].粮食与油脂,2015,28(12):1-3. [MA X H, LIU J S, CHEN X Y, et al. Research progress on sprouted grain and food application in china[J]. Cereals & Oils, 2015, 28(12): 1-3.]
- [6] 刘瑞,于章龙,柴永峰,等.粮谷及其发芽物质变化研究进展[J].食品工业科技,2019,40(13):293-298. [LIU R, YU Z L, CHAI Y F, et al. Research advances of substances variation in grain and germinated grain[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 293-298.]
- [7] 秦萍.发芽杂粮代餐粉的研制[D].沈阳:沈阳农业大学,2019. [QIN P. Development of meal replacement powder of germinated grains[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.]
- [8] 李朋收,刘洋洋,范冰冰,等.鹰嘴豆化学成分及药理作用研究进展[J].中国实验方剂学杂志,2014,20(11):235-238. [LI P S, LIU Y Y, FAN B D, et al. Research progress of chemical composition and pharmacological effectiveness of chickpeas[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2014, 20(11): 235-238.]
- [9] 肖俊松,吴华,张亚歌.鹰嘴豆萌发过程中营养成分和抗营养因子的变化规律[J].食品科学,2011,32(24):7037-7041. [XIAO J S, WU H, ZHANG Y G. Changes in nutritional composition and antinutritional factors during the germination process of chickpea (*Cicer arietinum* L.)[J]. Food Science, 2011, 32(24): 7037-7041.]
- [10] WONGSIGI S, OHSHIMA T, DUANGMAL K. Chemical composition, amino acid profile and antioxidant activities of germinated mung beans (*Vigna radiata*) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 1956-1964.
- [11] 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.
- [12] 胡亚军,姜莹,冯丽君,等.苦荞芽菜活性成分变化规律及营养成分分析评价[J].干旱地区农业研究,2008,107(2):117-121. [HU Y J, JIANG Y, FENG L J, et al. Analysis and evaluation of active components and nutrients in tartary buckwheat sprouts[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 107(2): 117-121.]
- [13] 黄金,秦礼康,石庆楠,等.藜麦萌芽期营养与功能成分的动态变化[J].食品与机械,2017,33(5):54-58. [HUANG J, QIN L K, SHI Q N, et al. Dynamic changes of nutritional and functional ingredients curing germination of quinoa[J]. Food & Machinery, 2017, 33(5): 54-58.]
- [14] 张端莉,桂余,方国珊,等.大麦在发芽过程中营养物质的变化及其营养评价[J].食品科学,2014,35(1):229-233. [ZHANG D L, YU G, FANG G S, et al. Nutrient change and nutritional evaluation of barley during germination[J]. Food Science, 2014, 35(1): 229-233.]
- [15] 郑少杰,任旺,张小利,等.绿豆芽萌发过程中氨基酸动态变化及营养评价[J].食品与发酵工业,2016,42(10):81-86. [ZHENG S J, REN W, ZHANG X L, et al. Dynamic changes of amino acids and nutritional evaluation during mung bean bud germination[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(10): 81-86.]
- [16] 梁亚静.不同加工方式对芸豆营养特性及抗氧化活性的影

- 响[D].长沙:中南林业科技大学,2015. [LIANG Y J. Effects of different processing methods on nutritional properties and antioxidant activity of kidney beans[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.]
- [17] 刘海燕. 不同浓度的微量元素对豌豆芽苗菜的生长和营养品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2015. [Effects of different concentrations of trace elements on growth and quality of pea sprouts[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.]
- [18] 冀佩双, 单璐, 吕国涛, 等. 柱前衍生高效液相色谱法测定糜子发芽过程中氨基酸变化[J]. 山西农业科学, 2015, 43(10): 1230-1233, 1236. [JI P S, SHAN L, LÜ G T, et al. Determination of amino acids by high performance liquid chromatography with pre-column derivatization during proso millet germination[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(10): 1230-1233, 1236.]
- [19] 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 Q W. Master dissertation changes of nutritional composition and starch physicochemical properties and correlation study during kidney bean germination[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015.]
- [20] 胡筱波, 朱新荣, 吴谋成. 豆类在发芽过程中脂肪酸含量的变化[J]. 粮油加工, 2007(7): 123-125. [HU X B. Changes of fatty acid content in beans during germination[J]. Cereals and Oils Processing, 2007(7): 123-125.]
- [21] ERIKA P V, ALCA J J, SARAIVA G R, et al. Comparison of the lipid profile and tocopherol content of four Peruvian quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars ('Amarilla de Marangani', 'Blanca de Juli', INIA 415 'Roja Pasankalla', INIA 420 'Negra Colana') during germination[J]. Journal of Cereal Science, 2019(88): 132-137.
- [22] 李童, 杨静静, 陆健. 大麦品种和制麦过程对麦芽含脂量的影响[J]. 啤酒科技, 2014(8): 59-63. [LI T, YANG J J, LU J. Effects of barley varieties and wheat making process on malt fat content[J]. Beer Tech, 2014(8): 59-63.]
- [23] 徐磊. 发芽对薏米营养组合理化特性及生物活性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [XU L. Effect of germination on the nutritional components, physicochemical properties and biological activities of adlay[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [24] 潘妹璇, 王嘉怡, 陈建, 等. 发芽糙米多糖微波辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 167-172, 194. [PAN S X, WANG J Y, CHEN J, et al. Optimization on process of microwave assisted extraction and antioxidant activities of polysaccharides from germinated brown rice[J]. Food & Machinery, 2017, 33(11): 167-172, 194.]
- [25] 张俊, 胡玲, 张三杉, 等. 不同发芽阶段高粱粉理化及功能特性的变化[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 68-74. [ZHANG J, HU L, ZHANG S S, et al. Changes of physicochemical and functional properties of sorghum flour at different germination stages[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(6): 68-74.]
- [26] 杨春, 丁卫英, 周柏玲, 等. 发芽对黑小麦、黑苦荞淀粉物理化学特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(12): 5-10. [YANG C, DING W Y, ZHOU B L, et al. Effects of germination on physicochemical properties of black wheat and black tartary buckwheat starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(12): 5-10.]
- [27] SHEKIB L A. In-vitro digestibility and microscopic appearance of germinated legume starches and their effect on dietary protein utilization[J]. Food Chemistry, 1994, 50(1): 59-63.
- [28] 连晓蔚. 肠道菌群利用几种膳食纤维体外发酵产短链脂肪酸的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011. [LIAN X W. Gut microbiota in vitro fermenting destarched dietary fiber to produce SCFA[D]. Guangzhou: Jinan University, 2011.]
- [29] 黄凯丰, 时政, 欧腾, 等. 荞麦苗的营养保健成分分析[J]. 北方园艺, 2011(11): 22-24. [HUANG K F, SHI Z, OU T. Analysis of nutritional and health components of buckwheat seedlings[J]. Northern Horticulture, 2011(11): 22-24.]
- [30] 蒋芮, 李雅婷, 欧阳鹏凌, 等. 发芽对黑大麦游离氨基酸及其他营养成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 38-42. [JIANG R, LI Y T, OUYANG P L, et al. Effects of germination on free amino acids and other nutrients in black barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 38-42.]
- [31] 周小理, 宋鑫莉. 萌动对植物籽粒营养成分的影响及荞麦萌动食品的研究[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2009, 9(3): 171-174. [ZHOU X L, SONG X L. Effects of sprouting animals on plant grain nutrients and buckwheat sprouting food[J]. Journal of Shanghai Institute of Applied Technology (Natural Science Edition), 2009, 9(3): 171-174.]
- [32] BOHN L, MEYER A S, RASMUSSEN S K. Phytate: Impact on environment and human nutrition. A challenge for molecular breeding[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2008, 9(3): 165-191.
- [33] 傅维, 吕晓玲, 孙勇民. 发芽黑米中氨基丁酸及矿物元素含量变化的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 178-180. [WEI F U, LÜ X L, SUN Y M. Study on content changes of γ -aminobutyric acid and mineral element during the processing of black rice germination[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(9): 178-180.]
- [34] 刘金芳, 胡广林, 唐琦, 等. 发芽对豇豆营养成分与微量元素的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(1): 100-105. [LIU J F, HU G L, TANG Q, et al. Effects of germination on nutritional composition and trace elements in cowpea[J]. Food Research and Development, 2018, 39(1): 100-105.]
- [35] LINTSCHINGER J, FUCHS N, MOSER H, et al. Uptake of various trace elements during germination of wheat, buckwheat and quinoa[J]. Crossref, 1997, 50(3): 223-237.
- [36] 张超, 黄卫宁, 卢艳. 荞麦芽营养及生产研究进展[J]. 粮食与油脂, 2005(5): 9-11. [ZHANG C, HUANG W N, LU Y. Research progress in nutrition and mass production of buckwheat sprout[J]. Journal of Cereals & Oils, 2005(5): 9-11.]
- [37] 张琴萍. 藜麦芽苗菜营养功能品质特性研究[D]. 成都: 成都大学, 2020. [ZHANG Q P. Study on the nutritional and functional characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Sprouts[D]. Chengdu: Chengdu University, 2020.]
- [38] 穆竟, 高健, 张娜. 改善种子萌发技术及其营养成分研究进展[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(16): 1-5. [MU J, GAO J, ZHANG

- N. Advances in improvement of seed germination technology and its nutritional components[J]. *Heilongjiang Science*, 2019, 10(16): 1-5.]
- [39] 陈淑芳. 富硒发芽苦荞生理变化及其蛋白抗氧化活性研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2019. [CHEN S F. Study on physiological changes and antioxidant activity of protein in Se-enriched and sprouted tartary buckwheat[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2019.]
- [40] 李海平, 李灵芝, 任彩文, 等. 温度、光照对苦荞麦种子萌发、幼苗产量及品质的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 34(5): 158-161. [LI H P, LI L Z, REN C E, et al. Effects of temperature and light on seed germination, seedling yield and quality of tartary buckwheat[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 34(5): 158-161.]
- [41] 胡洁. 藜麦萌发过程中营养物质变化规律及藜麦芽饮料研制[D]. 太原: 山西大学, 2017. [HU J. Nutrients change rules during germination of quinoa and quinoa malt beverage development[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017.]
- [42] 魏志敏, 和剑涵, 裴美燕, 等. 特色蔬菜之藜麦苗[J]. *蔬菜*, 2020(4): 62-64. [WEI Z M, HE J H, PEI M Y, et al. Characteristic vegetable-quinoa seedling[J]. *Vegetables*, 2020(4): 62-64.]
- [43] 黄碧光, 刘思衡. 麦苗的营养保健价值及其开发利用[J]. *食品研究与开发*, 2001, 22(5): 40-42. [HUANG B G, LIU S H. Nutritional and health value of wheat seedlings and its development and utilization[J]. *Food Research and Development*, 2001, 22(5): 40-42.]
- [44] 曾亚文, 杨涛, 普晓英, 等. 大麦籽粒中 γ -氨基丁酸、总黄酮和生物碱含量在发芽过程中的变化[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(1): 135-139. [ZENG Y W, YANG T, XIAO-YING P U, et al. Transformation of γ -aminobutyric acid and total flavones and alkaloids content in barley grains during germination process[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(1): 135-139.]
- [45] 朱秀敏, 王彩君, 王建军. 几种芽菜维生素 C 含量的比较研究[J]. *北方园艺*, 2012(3): 35-37. [ZHU X M, WANG C J, WANG J J. Comparative study on vitamin C content of several sprouts[J]. *Northern Horticulture*, 2012(3): 35-37.]
- [46] 曹菲菲, 王彦杰, 甄润英. 不同温度下绿豆萌发速度和主要成分的变化研究[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(16): 50-54. [CAO F F, WANG Y J, ZHEN R Y. Study on mung bean germination rate and main composition change under different temperature[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(16): 50-54.]
- [47] 李琼. 芸豆不同发芽阶段生物类黄酮对 DPPH 自由基的清除效率研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(20): 12072-12074. [LI Q. Study of scavenging activities on DPPH free radical by bioflavonoid of kidney beans at different germination periods[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(20): 12072-12074.]
- [48] 张欢. 光环境调控对植物生长发育的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010. [ZHANG H. Effect of light environment control on the growth and development in plant[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.]
- [49] 黄枝, 王美娟, 林碧英. LED 光质对豌豆芽苗菜产量及品质的影响[J]. *亚热带农业研究*, 2015, 11(2): 90-94. [HUANG Z, WANG M J, LIN B Y. Effects of LED light quality on the yield and quality of *Pisum sativum* sprouts[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2015, 11(2): 90-94.]
- [50] 耿灵灵, 陈华涛, 李群三, 等. LED 红蓝复合光对豌豆芽苗菜产量和营养品质的影响[J]. *福建农业学报*, 2017, 32(10): 1091-1095. [GENG L L, CHEN H T, QUN-SAN L I, et al. Effects of LED light exposure on yield and nutritional quality of pea sprouts[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 32(10): 1091-1095.]
- [51] 管康林. 种子生理生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009. [GUAN K L. Seed physiology and ecology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2009.]
- [52] BALASUNDRAM N, SUNDRAM K, SAMMAN S. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses[J]. *Food Chemistry*, 2006, 99(1): 191-203.
- [53] GARZO'N A G, DRAGO S R. Free α -amino acids, γ -aminobutyric acid (GABA), phenolic compounds and their relationships with antioxidant properties of sorghum malted in different conditions[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(8): 3188-3198.
- [54] TI H, ZHANG R, ZHANG M, et al. Dynamic changes in the free and bound phenolic compounds and antioxidant activity of brown rice at different germination stages[J]. *Food Chemistry*, 2014, 161: 337-344.
- [55] KIMA S, ZAIDUL I, MAEDA T, et al. A time-course study of flavonoids in the sprouts of tartary (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) buckwheats[J]. *Scientia Horticulturae*, 2007, 115(1): 13-18.
- [56] HIDALGO A, ŠAPONJAC V T, ČETKOVIĆ G, et al. Antioxidant properties and heat damage of water biscuits enriched with sprouted wheat and barley[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019: 114.
- [57] 王颖, 佐兆杭, 王欣卉, 等. 芸豆芽菜多酚对氧化损伤小鼠体内抗氧化及肝脏损伤修复作用[J]. *食品科学*, 2017, 38(21): 212-216. [WANG Y, ZUO Z H, WANG X H, et al. Effects of kidney bean sprout polyphenols on restoring antioxidant system and oxidative liver injury in mice[J]. *Food Science*, 2017, 38(21): 212-216.]
- [58] 孙国娟, 徐红艳, 崔泰花, 等. 荞麦芽功能性成分研究综述[J]. *食品科学*, 2012(8): 348-349, 352. [SUN G J, XU H Y, CUI T H, et al. Research review on the functional composition of buckwheat sprouts[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012(8): 348-349, 352.]
- [59] KIM S J, ZAIDUL I S M, SUZUKI T, et al. Comparison of phenolic compositions between common and tartary buckwheat (*Fagopyrum*) sprouts[J]. *Food Chemistry*, 2008, 110(4): 814-820.
- [60] 吕兵兵, 姚攀峰, 王官凤, 等. 光周期对苦荞芽菜生长与品质的影响[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(10): 1785-1794. [LÜ B B, YAO P F, WANG G, et al. Effect of photoperiod on growth and quality of tartary buckwheat sprouts[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(10): 1785-1794.]
- [61] 李丽, 李驰荣, 任晗堃, 等. 赤小豆萌芽过程中抗氧化活性及多酚类成分变化分析[J]. *食品工业*, 2015, 36(12): 208-211. [LI L, LI C R, REN H K, et al. Changing of antioxidant activity and ac-

- tive polyphenols in the sprouting process of the rice bean[J]. Food Industry, 2015, 36(12): 208–211.]
- [62] GUO X, LI T, TANG K, et al. Effect of germination on phytochemical profiles and antioxidant activity of mung bean sprouts (*Vigna radiata*)[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2012, 60(44): 11050.
- [63] PRADEEP S, GUHA M. Effect of processing methods on the nutraceutical and antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1643–1647.
- [64] 郑璐, 王兴国, 韩飞, 等. 发芽对糜子酚类化合物及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 124–128, 132. [ZHENG L, WANG X G, HAN F, et al. Effect of germination on phenolics and antioxidant activity of proso millet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 124–128, 132.]
- [65] 乞素冬. Resistin 与肥胖性 2 型糖尿病恒河猴模型相关性及其参与病理发生的分子机制研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2015. [QI S D. The correlation and molecular mechanisms of pathogenesis of resistin in obese type 2 diabetes rhesus monkey models[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2015.]
- [66] YANG N, REN G. Determination of d-chiro-inositol in tartary buckwheat using high-performance liquid chromatography with an evaporative light-scattering detector[J]. Crossref, 2008, 56(3): 757–760.
- [67] WANG L, LI X, NIU M, et al. Effect of additives on flavonoids, d - chiro -inositol and trypsin inhibitor during the germination of tartary buckwheat seeds[J]. Crossref, 2013, 58(2): 348–354.
- [68] JIA C, HU W, CHANG Z, et al. Acid α -galactosidase is involved in D-chiro-inositol accumulation during tartary buckwheat germination[J]. Polish Botanical Society, 2015: 53–58.
- [69] 宋雨, 邹亮, 赵江林, 等. 苦荞萌发过程中 D-手性肌醇含量变化的探究[J]. 食品科技, 2016, 41(2): 80–83. [SONG Y, ZOU L, ZHAO J L, et al. The change of D-chiro inositol content in tartary buckwheat during germination process[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(2): 80–83.]
- [70] 卢丞文. 荞麦中 D-手性肌醇分离提取与纯化研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2007. [LU C W. Extraction and purification research of D-chiro-inositol from buckwheat[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2007.]
- [71] 石磊, 刘超, 周柏玲, 等. 萌发条件对绿豆芽中_氨基丁酸含量的影响研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(3): 50–53. [SHI L, LIU C, ZHOU B L, et al. Effects of germination conditions on the content of γ -aminobutyric acid in mung bean sprouts[J]. Cereals & Oils, 2019, 32(3): 50–53.]
- [72] ZHANG Q, XIANG J, ZHANG L Z, et al. Optimizing soaking and germination conditions to improve gamma-aminobutyric acid content in japonica and indica germinated brown rice[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 10: 283–291.
- [73] SHARMA S, SAXENA D C, RIAR C S. Isolation of functional components β -glucan and γ -aminobutyric acid from raw and germinated barnyard millet (*Echinochloa frumentaceae*) and their characterization[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2016, 71(3): 231–238.
- [74] OH S, CHOI W G. Changes in the levels of 7-aminobutyric acid and glutamate decarboxylase in developing soybean seedlings[J]. Journal of Plant Research, 2001, 114(3): 309.
- [75] 霍怡然. 芽菜复合果蔬汁的制作及其减肥功效[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. [HUO Y R. Preparation of sprout compound fruit and vegetable juice and its weight-loss effect[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.]
- [76] MCCOY R G, HOUTEN H K V, ZIEGENFUSS J Y, et al. Increased mortality of patients with diabetes reporting severe hypoglycemia[J]. Diabetes Care, 2012, 35(9): 1897.
- [77] CONSTANTINO M I, MOLYNEAUX L, LIMACHER-GISLER F, et al. Long-term complications and mortality in young-onset diabetes[J]. DIABETES CARE, 2013, 36(12): 3863–3869.
- [78] CHENG A Y, FANTUS I G. Oral antihyperglycemic therapy for type 2 diabetes mellitus[J]. Canadian Medical Association or Its Licensors, 2005, 172(2): 213–226.
- [79] PENG C C, CHEN K C, YANG Y L, et al. Aqua-culture improved buckwheat sprouts with more abundant precious nutrients and hypolipidemic activity[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, 60(S1): 232–245.
- [80] LEE D G, JANG I S, YANG K E, et al. Effect of rutin from tartary buckwheat sprout on serum glucose-lowering in animal model of type 2 diabetes[J]. Acta Pharmaceutica, 2016, 66(2): 297–302.
- [81] WATANABE M, AYUGASE J. Effects of buckwheat sprouts on plasma and hepatic parameters in type 2 diabetic db/db mice[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(9): 294–299.
- [82] MOHAMED R S, MARREZ D A, SALEM S H, et al. Hypoglycemic, hypolipidemic and antioxidant effects of greensprouts juice and functional dairy micronutrients against streptozotocin-induced oxidative stress and diabetes in rats[J]. Heliyon, 2019, 5(2).
- [83] 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.
- [84] 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): 1017–1026.
- [85] CHOI H D, KIM Y S, CHOI I W, et al. Anti-obesity and cholesterol-lowering effects of germinated brown rice in rats fed with high fat and cholesterol diets[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2006, 38(5): 674–678.
- [86] 王玲平, 周生茂, 戴丹丽, 等. 植物酚类物质研究进展[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(5): 696–701. [WANG L P, ZHOU S M, DAI D L, et al. Progress in plant phenolic compounds[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(5): 696–701.]
- [87] CÁCERES P J, VILLALUENGA C M, AMIGO L, et al. Maximising the phytochemical content and antioxidant activity of ecuadorian brown rice sprouts through optimal germination conditions[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 407–414.
- [88] HIDALGO A, FERRARETTO A, NONI I D, et al. Bioactive compounds and antioxidant properties of pseudocereals-enriched

- water biscuits and their *in vitro* digestates[J]. *Food Chemistry*, 2017, 240: 799–807.
- [89] 白永亮, 凌志洲, 陈甜妹, 等. 青稞种子萌动过程中抗氧化活性的变化[J]. *广东农业科学*, 2019, 46(11): 119–126. [BAI Y L, LING Z Z, CHEN T M, et al. Changes in antioxidant activity of highlandbarley seeds during germination[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2019, 46(11): 119–126.]
- [90] 王雪. 发芽藜麦汁饮料的研制及其抗氧化功能研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018. [WANG X. Research on the germinated quinoa juice beverage and Its antioxidant function[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018.]
- [91] 张淑杰, 姜宏伟, 康玉凡. 豌豆芽菜多糖超声辅助提取优化及抗氧化研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 217–223. [ZHANG S J, JIANG H W, KANG Y F. Optimization of ultrasonic-assisted extraction and antioxidant activity of polysaccharide from pea sprouts[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(10): 217–223.]
- [92] APEL K, HIRT H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2013, 55(1): 373–399.
- [93] NAM T G, LIM T, LEE B H, et al. Comparison of anti-inflammatory effects of flavonoid-rich common and tartary buckwheat sprout extracts in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 and peritoneal macrophages[J]. *Oxidative Medicine & Cellular Longevity*, 2017, 2017: 1–12.
- [94] IMAM M U, ISHAK A, OOI D J, et al. Germinated brown rice regulates hepatic cholesterol metabolism and cardiovascular disease risk in hypercholesterolaemic rats[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 8: 193–203.
- [95] SAKAMOTO S, HAYASHI T, HAYASHI K. Pre-germinated brown rice could enhance maternal mental health and immunity during lactation[J]. *European Journal of Nutrition*, 2007, 46(7): 391–396.
- [96] GIMÉNEZ-BASTIDA J A, LAPARRA-LLOPIS J M, ZIELINSKI N B H. Buckwheat and buckwheat enriched productsexert an anti-inflammatory effect on the myofibroblasts of colon CCD-18Co[J]. *Food & Function*, 2018, 9: 3387–3397.
- [97] MAMIYA T, KISE M, MORIKAWA K. Effects of pre-germinated brown rice on depression-like behavior in mice[J]. *Pharmacology Biochemistry & Behavior*, 2007, 86(1): 62–67.
- [98] 陈振, 康玉凡. 豆类种子及萌发过程中功效性成分研究概述[J]. *中国食物与营养*, 2012, 18(10): 27–32. [CHEN Z, KANG Y F. Summary of studies on the functional components of legume seeds and during germination[J]. *Food and Nutrition in China*, 2012, 18(10): 27–32.]
- [99] 冯婷. 鹰嘴豆营养保健价值及其应用[J]. *中国食物与营养*, 2011, 17(1): 67–69. [FENG T. Nutritional and health value of chickpea and its application[J]. *Food and Nutrition in China*, 2011, 17(1): 67–69.]
- [100] 陈亚云, 康玉凡. LED 在芽苗菜生产中的应用及前景展望[J]. *中国食物与营养*, 2016, 22(8): 35–39. [CHEN Y Y, KANG Y F. Application and prospect of LED in sprout production[J]. *Food and Nutrition in China*, 2016, 22(8): 35–39.]
- [101] PENG L X, ZOU L, SU Y M, et al. Effects of light on growth, levels of anthocyanin, concentration of metabolites in *Fagopyrum tataricum* sprout cultures[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2015, 50: 1382–1389.
- [102] JI H B, TANG W, ZHOU X L, et al. Combined effects of blue and ultraviolet lights on the accumulation of flavonoids in tartary buckwheat sprouts[J]. *Polish Journal of Food & Nutrition Sciences*, 2016, 66(2): 93–98.
- [103] LIU H K, CHEN Y Y, HU T T, et al. The influence of light-emitting diodes on the phenolic compounds and antioxidant activities in pea sprouts[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 25: 459–465.
- [104] NAM T G, KIM D, EOM S H. Effects of light sources on major flavonoids and antioxidant activity in common buckwheat sprouts[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018.
- [105] 王珺儒, 易倩, 帖青清, 等. 不同光质对苦荞芽黄酮类物质及抗氧化活性的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(5): 213–218. [WANG J R, YI Q, TIE Q Q, et al. Effect on flavonoids and antioxidant activity of the bud of tartary buckwheat after treatment of different LED light sources[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(5): 213–218.]
- [106] 雒晓鹏, 卜星星, 赵海霞, 等. LED 光源对芽期苦荞黄酮合成的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(3): 86–89. [LUO X P, BU X X, ZHAO H X, et al. Effects of LED lights on the levels of flavonoid during germination of tartary buckwheat[J]. *Food Science*, 2015, 36(3): 86–89.]
- [107] TUAN P A, THWE A A, KIM Y B, et al. Effects of white, blue, and red light-emitting diodes on carotenoid biosynthetic gene expression levels and carotenoid accumulation in sprouts of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61: 12356–12361.
- [108] TSURUNAGA Y, TAKAHASHI T, KATSUBE T, et al. Effects of UV-B irradiation on the levels of anthocyanin, rutin and radical scavenging activity of buckwheat sprouts[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 552–556.
- [109] ZHANG Y, ZHENG S, LIU Z, et al. Both HY5 and HYH are necessary regulators for low temperature-induced anthocyanin accumulation in arabidopsis seedlings[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(4): 367–374.
- [110] LI S, BAI Y, LI C, et al. Anthocyanins accumulate in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) sprout in response to cold stress[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(8): 1–8.
- [111] 陈进红, 文平. 温度对荞麦芽菜叶片及籽粒芦丁含量的影响[J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2005, 31(1): 59–61. [CHEN J H, WEN P. Effects of temperature on rutin content of seedling, leaf and seed of buckwheat[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2005, 31(1): 59–61.]
- [112] ZHAO G, ZHAO J L, PENG L X, et al. Effects of yeast polysaccharide on growth and flavonoid accumulation in *Fagopyrum tataricum* sprout cultures[J]. *Molecules*, 2012, 17: 11335–11345.
- [113] ZHAO J, ZHONG L, ZOU L, et al. Efficient promotion of the sprout growth and rutin production of tartary buckwheat by associated fungal endophytes[J]. *Cereal Research Communications*,

2014, 42(3): 401–412.

[114] JEONG H, SUNG J, YANG J, et al. Effect of sucrose on the functional composition and antioxidant capacity of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprouts[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 43: 70–76.

[115] PARK C H, YEO H J, PARK Y E, et al. Influence of chitosan, salicylic acid and jasmonic acid on phenylpropanoid accumulation in germinated buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. *Foods*, 2019, 8: 153.

[116] LIM J, PARK K, KIM B, et al. Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135: 1065–1070.

[117] SIM U, SUNG J, LEE H, et al. Effect of calcium chloride and sucrose on the composition of bioactive compounds and antioxidant activities in buckwheat sprouts[J]. *Food Chemistry*, 2020, 312: 126075.

[118] 万燕, 向达兵, 曾雪玲, 等. 盐胁迫对苦荞麦芽菜产量及黄酮含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2016(7): 328–332. [WAN Y, XIANG D B, ZENG X L, et al. Salt stress influence on yield of tartary buckwheat sprouts and flavonoids content[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016(7): 328–332.]

[119] MA Y, WANG P, ZHOU T, et al. Role of Ca^{2+} in phenolic compound metabolism of barley (*Hordeum vulgare* L.) sprouts under NaCl stress[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(11): 5176–5186.

[120] MICHA S. Elicitation with abiotic stresses improves pro-health constituents, antioxidant potential and nutritional quality of lentil sprouts[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2015, 22(4): 409–416.

[121] KIM H, PARK K, LIM J. Metabolomic analysis of phenolic compounds in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprouts treated with methyl jasmonate[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(10): 5707–5713.

[122] YANG H J, LIM J H, PARK K J, et al. Methyl jasmonate treated buckwheat sprout powder enhances glucose metabolism by potentiating hepatic insulin signaling in estrogen-deficient rats[J]. *Nutrition*, 2016, 32: 129–137.

[123] JIA L, TIAN J Y, WEI S J, et al. Hydrogen gas mediates ascorbic acid accumulation and antioxidant system enhancement in soybean sprouts under UV-A irradiation[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 16366.