

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060341

XIANG Yue, CAO Yanan, ZHAO Gang, et al. Advances in the Nutritional Function and Safety of Coarse Cereals [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(14): 362–370. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060341

· 专题综述 ·

# 杂粮营养功能与安全研究进展

向月, 曹亚楠, 赵钢, 彭镰心\*

(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)

**摘要:**膳食失衡是相关代谢性疾病如 2 型糖尿病发生的重要诱因, 而膳食干预是维护机体健康最有效、安全的策略。杂粮中富含多种营养功能因子, 具有多种活性, 是日常膳食的重要组分来源, 其重要性已得到广泛认可。然而, 目前缺乏杂粮营养功能的系统论述, 同时忽视了杂粮自身或不当食用方式带来的安全风险, 使得杂粮产品定位模糊, 不利于杂粮精深加工以及差异化精准营养食品的开发。因此, 本文从杂粮的营养与功能成分、安全性两方面对杂粮进行系统梳理, 重新审视杂粮对人体的利弊, 旨在规避杂粮的食用风险, 定位精准化杂粮产品, 为营养安全的杂粮产品开发提供参考, 助推杂粮产业健康发展。

**关键词:**杂粮, 营养成分, 功能成分, 安全性, 抗营养因子

中图分类号: TS210.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-0306(2021)14-0362-09

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2020060341](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060341)

## Advances in the Nutritional Function and Safety of Coarse Cereals

XIANG Yue, CAO Yanan, ZHAO Gang, PENG Lianxin\*

(Key Laboratory of Multigrain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, School of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Dietary imbalance is an important cause of chronic metabolic diseases such as type 2 diabetes, while the dietary intervention is one of the most effective and safe way to maintain the health of body. Coarse cereals are full of a variety of nutritional function factors, and have a variety of activities. It is widely recognized that coarse cereals are an important part in the daily diet structure. However, the current researches are lack of the systematic discussion of coarse cereals' nutrition function and usually neglect the safety risks caused by the ingredients and anti-nutrition factors of themselves and inappropriate eating habits. Making the suitable and accurate position of the coarse cereals in dietary intervention is unclear. So it is not conducive to the deep processing of coarse cereals and the development of produce differentiated precision nutrition food. Therefore, to solve the above problems, this paper tries to systematically sort out the nutrition and functional composition of coarse cereals and summary the research of the coarse cereals' safety. The advantages and disadvantages of coarse cereals effects on human body are reviewed, aims to avoid the edible risks of coarse cereals. This paper would provide a reference to produce precision nutrition food, and promote the healthy development of coarse cereals industry.

**Key words:** coarse cereals; nutritional ingredients; functional ingredients; safety; anti-nutrition factors

广义上的杂粮是指除水稻、小麦以外的粮谷类作物。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。杂粮一般具有种植面积少、生育周期短、区域性强、栽培技术特殊等特征。《黄帝内经》<sup>[1]</sup>

曾记载“五谷为养、五果为助、五畜为益、五菜为充”的饮食平衡原则, 提示多种的食物搭配可获得更均衡的营养, 其中五谷中包含有杂粮, 说明杂粮在膳食中自古具有重要地位;《本草纲目》<sup>[2]</sup>中记载谷类有 33 种, 豆类 14 种, 均为当时的主要粮食作物。我国

收稿日期: 2020-06-29

基金项目: 四川省科技计划项目 (2019YFS0526, 2018CC0021); 公益性行业 (农业) 科研专项项目 (201303069); 国家现代农业产业技术体系四川创新团队项目 (SCCXTD-2020-11)。

作者简介: 向月 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 杂粮营养与加工, E-mail: [1576564083@qq.com](mailto:1576564083@qq.com)。

\* 通信作者: 彭镰心 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 药食同源作物功能成分及深加工, E-mail: penglianxin@cdu.edu.cn。

粮食结构在历史上不断演变, 16 世纪分别引进马铃薯、玉米等作物后, 部分杂粮基本退出饮食组成。20 世纪 90 年代以前, 我国大米、小麦等人均产量不足, 南方饮食以大米加甘薯、苦荞等杂粮为主, 北方以小麦加小米等杂粮为主, 21 世纪以来, 南方饮食则以精大米为主, 北方以精细面粉为主, 饮食结构发生极大变化。

近年来, 随着膳食结构的改变, 我国肥胖人群迅速增长, 慢性疾病患病率激增, 威胁人们的健康。据 Zhang 等<sup>[3]</sup> 报道, 自 2004 年以来, 我国全身性肥胖的患病率上升了 90%。肥胖以及由肥胖引起的各种代谢疾病已成为 21 世纪威胁人类健康和影响生活质量的最大杀手, 严重影响人们生活水平与质量。《健康中国行动(2019-2030 年)》已明确提出未来健康管理模式应以预防为主、治疗为辅, 食疗为主、药疗为辅。杂粮富含各种功能因子, 在饮食防控各类慢性疾病中有显著优势, 因此其开发利用成为近年来的研究热点。目前市场上有各类杂粮米、面、糕点、茶、酒、粥等, 实际搭配往往只考虑到感官特性, 对杂粮种类、用量的搭配缺乏科学依据。杂粮种类繁多, 富含各种宏量元素和功能性成分, 经科学搭配可满足人体营养所需。如豆类富含蛋白质, 碳水化合物较低; 荞麦含有均衡的氨基酸, 富含赖氨酸等限制性氨基酸; 燕麦富含  $\beta$ -葡聚糖; 荞麦、燕麦、青稞等杂粮 GI 值低于大米、小麦等主食。杂粮中富含酚酸、黄酮、植物甾醇、膳食纤维、微量元素等, 具有抗炎、调节血糖、血脂、血压及改善心血管疾病等功能<sup>[4]</sup>。虽然目前不同研究者的工作都证实杂粮具有调控慢性疾病的生理活性, 但是其作用途径和机制以及主要生物效应成分有多种观点, 从而限制了建立针对性强, 可控性好的品质评价指标和方法, 妨碍杂粮品种优良选育和产品的良好监控, 成为高附加值与精准杂粮营养产品开发的瓶颈。杂粮长期被作为粮食食用, 大多安全可靠, 但食用不当或过量食用仍会引起一定风险。《本草纲目》<sup>[2]</sup> 记载荞麦: “脾胃虚寒人食之, 则大脱元气而落须眉, 非所宜矣”; 苦荞: “苦荞麦, 多食伤胃, 发风动气, 能发诸病……”可见, 杂粮的食用安全问题是一直存在的, 生活中的杂粮过敏、中毒等事件应引起我们的注意。根据现代饮食结构合理食用杂粮则产生正效应, 过量食用或搭配不当则可能产生负效应。

杂粮营养功能作用明确, 可降低疾病的发生, 有助于大众健康保健已形成共识。随着消费者自我保健养生等意识的增强, 杂粮的市场具有广阔前景。杂粮的营养与功能研究近年来已成为热点, 但目前消费者对杂粮的认识不足, 杂粮的论述相对分散, 未能突显各种杂粮的特色与地位, 使杂粮产品在市场上的定位模糊。同时当前研究侧重于对杂粮保健功能的开发而对杂粮自身或不当食用方式带来的安全风险缺乏重视, 缺乏有力的检测与监管方式, 影响消费者信

心, 一定程度上限制了杂粮产业的发展。对杂粮的认识的模糊性与局限性, 使得杂粮产品的开发具有一定的盲目性, 消费者难以达到其保健期许, 制约杂粮产业发展。差异化精准营养食品的开发对于糖尿病病人等特殊人群具有重要意义。基于此, 本文从杂粮营养功能成分、活性作用以及安全风险几个方面系统阐明杂粮在膳食健康中的作用地位, 重新审视杂粮在日常生活中的保健作用机制, 认识杂粮产品作用的针对性与食用安全性, 为杂粮产业发展与精准营养食品开发提供参考。随着消费观念的升级, 针对糖尿病等慢性疾病预防的保健食品前景可观, 深入探究杂粮的营养与功能作用, 有助于准确认识杂粮的营养特点, 增强消费者信心, 激励开发者投入研发差异化精准营养食品, 激发市场活力, 形成良好的产业发展链, 推动杂粮整个产业的发展与繁荣。

## 1 杂粮营养与功能

### 1.1 杂粮的营养成分

单一的饮食来源不利于身体健康<sup>[5]</sup>, 杂粮种类繁多, 营养成分丰富, 同时不同杂粮中蛋白质、脂肪、碳水化合物、矿物元素、维生素等营养成分组成与含量差异较大(表 1)<sup>[6]</sup>, 因此, 杂粮科学搭配能有利于人体健康。总的来说, 杂粮的营养成分含量普遍高于日常食用的小麦、稻谷, 各类杂粮的具体含量又根据种类、品种不同而有所差异, 可以均衡日常营养吸收。以《中国食物成分表》中数据为例, 豆类碳水化合物普遍低于谷物类, 而有利于改善肠道微生态的不溶性膳食纤维普遍高于谷物类<sup>[7]</sup>。豆类杂粮一般含有比稻米、小麦及谷类杂粮更高的蛋白质, 是植物蛋白的重要来源, 如黄豆、黑豆、青豆等杂粮蛋白质含量均高于 30%, 豌豆、芸豆、赤小豆、蚕豆等蛋白含量高于 20%。赖氨酸是谷物类粮食的限制性氨基酸, 黄豆、黑豆等豆类杂粮普遍有较高的赖氨酸, 而在谷类杂粮中赖氨酸含量较高的主要是藜麦、荞麦, 分别为 760、560 mg/100 g。维生素与矿物元素在人体内既不提供能量也不构成组织, 但在调节人体代谢中起着重要作用, 是人体不可缺少的一部分。维生素 E 又称生育酚, 除具有抗氧化作用外还可以促进性激素分泌, 豆类杂粮含有较高的维生素 E, 例如, 黄豆、黑豆、青豆、赤小豆、眉豆等总维生素 E 含量超过 10 mg/100 g, 而在谷类杂粮中, 含量较高的有小米、糜子、荞麦, 分别为 3.63、3.5、4.4 mg/100 g, 高于小麦和稻米中的含量。具有促进体内新陈代谢, 参与氧化和能量代谢, 提高蛋白质、铁的吸收等作用的维生素 B<sub>2</sub> 在杂粮中的含量多高于小麦和稻谷, 在黑豆、苦荞麦粉中含量较高, 分别为 0.33、0.21 mg/100 g。豆类杂粮也含有较高的维生素 A、胡萝卜素等。Ca 元素是牙齿与骨骼的重要组成部分, 具有维持肌肉和神经的正常活动、预防骨质疏松的作用, 豆类杂粮富含 Ca 元素, 黄豆、黑豆、青豆 Ca 含量均高于 100 mg/100 g, 约为小麦、大米的 5~25 倍。糜子

含有较高的硒( $12.01 \mu\text{g}/100 \text{ g}$ ), 青稞则富含铁元素( $40.7 \text{ mg}/100 \text{ g}$ )<sup>[16]</sup>。

表1 常见粮食基本营养成分  
Table 1 Basic nutrients for common grains

名称	蛋白质(g)	脂肪(g)	碳水化合物(g)	膳食纤维(g)
小麦	11.9	1.3	75.2	10.8
稻米代表值	7.9	0.9	77.2	0.6
黑米	9.4	2.5	72.2	3.9
大麦	10.2	1.4	73.3	9.9
青稞	8.1	1.5	75	1.8
小米	9	3.1	75.1	1.6
高粱米	10.4	3.1	74.7	4.3
糜子(带皮)	10.6	0.6	75.1	6.3
苦荞麦粉	9.7	2.7	66	5.8
荞麦	9.3	2.3	73	6.5
薏米	12.8	3.3	71.1	2
黄豆	35	16	34.2	15.5
黑豆(干)	36	15.9	33.6	10.2
青豆(干)	34.5	16	35.4	12.6
赤小豆(干)	20.2	0.6	63.4	7.7
芸豆(干/红)	21.4	1.3	62.5	8.3
蚕豆(干)	21.6	1	61.5	1.7
蚕豆(带皮)	24.6	1.1	59.9	10.9
蚕豆(去皮)	25.4	1.6	58.9	2.5
豌豆(干)	20.3	1.1	65.8	10.4
豌豆(花)	21.6	1	63.6	6.9

注: 表中数据为在100 g粮食中测得的含量。

食物营养价值的高低不仅取决于营养成分的组成与含量, 还取决于机体消化吸收利用率。粮食中淀粉、蛋白质、脂肪等营养成分是机体供能的主要物质, 但随着研究的深入, 发现由于组成不同, 不同杂粮的营养特性也有较大差异。淀粉消化速度对人体生理功能有重要影响, 淀粉根据其消化速度又可分为快速消化淀粉、慢速消化淀粉、抗性淀粉等。苦荞等杂粮慢速消化淀粉、抗性淀粉比例高于小麦、大米等。实验证明慢消化淀粉、抗性淀粉具有调控血糖的作用<sup>[8-10]</sup>。淀粉消化速度除受自身结构影响外, 还与粮食中存在的其它物质如蛋白质等有关<sup>[11]</sup>, 燕麦粉中本身存在的蛋白质在一定程度上延缓淀粉消化<sup>[12]</sup>。这可能是杂粮发挥活性的重要途径, 也是传统食品和药品的重要区别。在考虑糖尿病病人适合饮食结构时提出的食物血糖生成指数(GI)的概念, 是食物的一种重要生理学参数, 是衡量食物引起餐后血糖反应的一项有效指标, 它表示含50 g可利用碳水化合物的食物和相当量的葡萄糖或面包在一定时间(一般为2 h)体内血糖应答水平百分比值。高GI的食物说明进入胃肠后消化快、吸收率高、葡萄糖释放快。对于杂粮而言, 豆类杂粮GI值普遍低于谷物类杂粮。荞麦、玉米、燕麦、黑米等谷物类杂粮GI值低于大米。蛋白质、脂肪等由于其氨基酸、脂肪酸组成不同, 其生理活性也不尽相同, 但目前其机制研究鲜有报道。对食物的营养物质特性研究, 有助于针对性的

设计适合特殊群体甚至个体的营养健康食谱。

## 1.2 杂粮功能成分及活性

相对大米和小麦等主粮, 杂粮富含的功能性成分对于改善膳食结构、维持人体健康具有重要意义。杂粮中的功能性成分主要包括多酚(酚酸与黄酮)、糖醇、蒽醌等, 具有调节血糖、血脂、血压, 改善非酒精性脂肪肝、心脑血管系统疾病等活性作用。

**1.2.1 多酚** 多酚是具有生物活性的植物次生代谢的重要产物, 结构上带有一个或多个芳香环和羟基, 包括酚酸和黄酮等。多酚在藜麦、青稞、糜子、苦荞、鹰嘴豆等杂粮中广泛存在。在藜麦中检测出23种多酚, 主要有香草酸、阿魏酸及其衍生物, 黄酮类的槲皮素、山奈酚及其糖苷<sup>[13]</sup>。Multari等<sup>[14]</sup>对八种芬兰燕麦中酚酸进行分析, 它们的含量范围为 $1202\pm 52.9\sim 1687\pm 80.2 \text{ mg/kg}$ , 普遍发现四种酚酸: 阿魏酸、邻香豆酸、对香豆酸和丁香酸。Hao等<sup>[15]</sup>用HPLC-MS方法分析了青稞中主要酚酸, 包括阿魏酸、p-香豆酸、香草酸和香草醛等。臧盛<sup>[16]</sup>在糜子壳粉自由酚与结合酚提取物中均检测出了没食子酸、p-香豆酸、绿原酸、原儿茶酸、阿魏酸、儿茶素、槲皮素和香草酸。Guo等<sup>[17]</sup>检测到在苦荞中芦丁含量为 $518.54\sim 1447.84 \text{ mg}/100 \text{ g}$ , 主要有对羟基苯甲酸、阿魏酸和原儿茶酸等8种酚酸。李文婷<sup>[18]</sup>在黄豆、赤豆、鹰嘴豆、蚕豆、芸豆、小扁豆可溶性酚类检测分析出了75种酚类, 其中对羟基苯甲酸、原儿茶素、香豆酸普遍存在。另外, 黄酮普遍存在于水果和蔬菜中, 极少存在于谷物和豆类杂粮中, 而苦荞中大量黄酮以芦丁形式存在, 在加工中又极易转化成槲皮素, 因此是膳食黄酮的重要补充来源。花青素(anthocyan)在有特殊色泽杂粮尤其是杂豆中含量丰富。陈长应等<sup>[19]</sup>测得黑荞麦中花青素含量在 $0.6\sim 4.2 \text{ mg/g}$ 。李文婷等<sup>[18]</sup>提取和分析鉴定黑色小扁豆中含有的花青素主要为飞燕草-3-O-(2-O- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖基- $\alpha$ -L-吡喃阿拉伯糖苷)和矢车菊素衍生物。

杂粮多酚类主要有以下活性:  
 a. 抗氧化活性。例如, 荞麦多酚具有显著的清除自由基的作用<sup>[20-21]</sup>, 燕麦多酚可以改善肝脏抗氧化防御系统<sup>[22]</sup>。  
 b. 降糖、降脂。苦荞多酚及黄酮对糖脂代谢的调节作用已成为当前研究的热点<sup>[23]</sup>。实验证明添加黄酮类化合物可减少高脂膳食引起的血浆中的TC、TG及LDL-C浓度升高<sup>[24]</sup>。  
 c. 抗癌活性。当前体内及体外实验发现黄酮类对癌症有良好的防治功效, 但流行病学研究表明只有扁豆黄酮与降低乳腺癌发病率相关<sup>[25]</sup>。  
 d. 调节心血管系统。燕麦多酚能抑制促炎因子的表达<sup>[26]</sup>。黑青稞中以花青素为主的类黄酮物质在抑制心肌细胞凋亡, 促进抑凋亡蛋白Bcl-2的表达等<sup>[27]</sup>。多酚类物质是多种杂粮的主要活性物质之一, 当前研究成果为多酚类物质的应用奠定了一定的理论基础。但由于多酚类物质组成及含量与杂粮种类、品

种、组织部位等因素相关, 在研究方面深度与广度不足, 结合新技术新方法可以使杂粮多酚类物质的研究进一步深入, 有利于杂粮多酚类在生物、医药、食品等领域的充分利用。

**1.2.2 糖醇类** 糖醇类化合物主要有手性肌醇及半乳糖苷, 资源较为稀少, 目前仅发现存在于荞麦和绿豆等豆类中。D-手性肌醇(DCI)在自然界中多以其衍生物的形式存在。荞麦中主要是荞麦糖醇<sup>[28]</sup> 和 D-手性肌醇<sup>[29]</sup>。研究发现, DCI 主要集中在苦荞麦胚芽中<sup>[30]</sup>, 苦荞麸皮是苦荞籽粒中手性肌醇及其衍生物含量最高的部分<sup>[31]</sup>。绿豆中的 DCI 含量高于荞麦<sup>[32]</sup>。Yao 等<sup>[33]</sup> 使用 HPLC 分离并测得 110 种绿豆种子样品中 DCI 含量为 0.43~5.79 mg/g。

DCI 具有促进肝脏脂代谢、抗氧化、抗衰老、抗炎等生理功能<sup>[34]</sup>。Cheng 等<sup>[35]</sup> 研究发现苦荞 DCI 可以通过调节 PKCe-PI3K / AKT 轴来防止肝脏糖异生, 减少脂质沉积并改善胰岛素抵抗。Hu 等<sup>[36]</sup> 研究表明, 摄入含有 DCI 的苦荞提取物(DTBE)对高果糖(HF)饮食引起的高血糖症和小鼠肝损伤具有保护作用。么杨<sup>[37]</sup> 采用发芽的方法富集绿豆中的 DCI, 发现富含 DCI 的绿豆芽具有降血糖的作用。杂粮糖醇一方面被用于开发具有抗胰岛素抵抗等作用的药物, 另一方面用于开发预防调理糖尿病等代谢综合征的保健品。其利用程度受限于糖醇类资源缺乏, 因此, 除加强杂粮糖醇的功能及其机理研究外, 还应重点探寻糖醇类新资源和研究改进提取工艺等。

**1.2.3 葱醌类** 葱醌是一种醌类化合物, 葱醌类物质中大黄素、大黄酚和大黄酸等被视为重要的活性成分。当前对葱醌类的研究主要集中在各类中草药, 杂粮中则在苦荞发现了葱醌类物质。包塔娜等<sup>[38]</sup> 和卫星星等<sup>[39]</sup> 分别从苦荞麦和苦荞籽中分离提取到大黄素(emodin)。Peng 等<sup>[40]</sup> 采用 HPLC-DAD 测定了苦荞中大黄素含量, 结果表明大黄素含量在 1.72~2.1 mg/kg 之间。吴兴强<sup>[41]</sup> 利用选择加速溶剂萃取(SPLE)结合超高效液相色谱(UPLC)检测黑苦荞样品及其相关产品中大黄素含量, 检测到浓度为 1.8 mg/kg。Wu 等<sup>[42]</sup> 建立了高效液相色谱-二极管阵列检测器(UPLC-DAD)耦合高效分离和快速测定苦荞中葱醌的新方法, 从苦荞提取物中有效分离了橙黄决明素、芦荟大黄素等 6 种葱醌。

葱醌类物质具有较强活性, 是传统泻药的主要活性成分<sup>[43]</sup>, 具有显著的泻下作用, 此外还有抗氧化<sup>[44]</sup>、抗癌<sup>[45]</sup>、抗糖尿病<sup>[46]</sup> 等多种生理活性。因苦荞中葱醌类成分含量较低, 目前研究相对较少, 但作为食物, 其食用量往往较大, 是否会产生相关活性(如润肠通便)或造成安全风险(如引起腹泻), 应引起重视。

**1.2.4 生物碱** 生物碱是一类天然含氮的碱性有机化合物, 常以来源进行命名, 杂粮中发现的有燕麦生物碱、藜麦生物碱、豆类生物碱等。鹿成稻<sup>[47]</sup> 对鹰

嘴豆 70% 醇提取物进行分离, 首次得到了鹰嘴豆生物碱类成分。Tang 等<sup>[13]</sup> 确认了黑藜麦种子中的色素主要是甜菜碱。Singh 等<sup>[48]</sup> 发现燕麦生物碱主要是由羟基蒽醌酸和对香豆素、阿魏酸或咖啡酸形成的。Bratt 等<sup>[49]</sup> 从燕麦提取物中分离出的 3 种结构 2p、2f 和 2c 的燕麦生物碱。刘树兴等<sup>[50]</sup> 对藜麦生物碱的进行提取, 最高可达 2.89 mg/g。

生物碱具有多种功能<sup>[51]</sup>, 主要具有以下作用:  
a. 抑制癌细胞生长。Wang 等<sup>[52]</sup> 发现 2p 结构的燕麦生物碱表现出重要的生物学活性, 可以在体外抑制人宫颈癌细胞的增殖。  
b. 抗菌消炎。研究发现燕麦生物碱至少部分地通过抑制核因子 κB(NF-κB)活化来降低内皮促炎细胞因子的表达<sup>[26]</sup>, 绿豆生物碱对金黄色葡萄球菌、大肠埃希氏菌和枯草芽孢杆菌均有明显的抑菌作用, 且生物碱浓度大小与抑菌效果成正比<sup>[53]</sup>。  
c. 抗病毒作用。鹿成稻<sup>[47]</sup> 研究发现鹰嘴豆总生物碱具有体外抗乙型肝炎病毒活性, 抑制作用随着浓度与时间增加而逐渐增强。杂粮生物碱结构复杂多样, 作用机制具有多样性与独特性, 继续开发新的杂粮来源生物碱资源, 对生物碱的功能与作用机制进行研究, 可促进杂粮综合利用, 提高附加值。

**1.2.5 膳食纤维** 膳食纤维是一种不能消化吸收也不能产生能量, 但能在肠道发酵的植物性成分、碳水化合物及其类似结构的总和, 被称为人体第七大营养素, 是杂粮的重要功能因子。膳食纤维可分为可溶性膳食纤维与不可溶性膳食纤维。苦荞中含有 3.4%~5.2% 的膳食纤维, 其中可溶性膳食纤维占膳食纤维总量的 0.68%~1.56%<sup>[54]</sup>。王锐<sup>[55]</sup> 研究显示糜米中膳食纤维含量 6.62%, 其中不溶性膳食纤维 6.13%, 可溶性膳食纤维 0.49%。张艳莉等<sup>[56]</sup> 使用超声波辅助复合酶提取脱脂后奶白花芸豆豆渣中膳食纤维, 水不溶性与水溶性膳食纤维的提取率分别可以达到 60.11% 和 5.63%。β-葡聚糖是杂粮中水溶性膳食纤维中含量较为丰富的一种。75 个品种青稞中的 β-葡聚糖的平均含量为 5.25%, 含量最高的品种达 8.62%<sup>[57]</sup>。燕麦中 β-葡聚糖含量为 3.67%~4.48%<sup>[58]</sup>。随着研究的深入, 在生理功能上具有与膳食纤维相似作用的抗性淀粉(RS)也被 FAO 列为膳食纤维的一种。杂粮中抗性淀粉的研究是近年来的热点。荞麦<sup>[59]</sup>、蚕豆<sup>[60]</sup>、青稞<sup>[61]</sup> 等中都有发现抗性淀粉, 高粱中的抗性淀粉含量高于玉米、大米等, 含量最高的高粱品种“吉杂 131 号”可以达到 22.21 g/100 g<sup>[62]</sup>。

膳食纤维具有以下作用:  
a. 对减肥具有很好的功效。大麦 β-葡聚糖可显著降低试验者的体重、内脏脂肪等<sup>[63]</sup>。燕麦 β-葡聚糖可以使人产生饱腹感<sup>[64]</sup>, 同时发现含 5% 的燕麦 β-葡聚糖的高脂饮食小鼠与正常饮食小鼠的体重与皮下脂肪组织没有显著差异。董吉林等<sup>[65]</sup> 发现高粱抗性淀粉可显著降低体重, 影响大鼠体脂分布。  
b. 调节血脂。研究表明鹰嘴豆膳食纤维通过提高高脂血症小鼠肠道菌群多样

性<sup>[66]</sup>;而抗性淀粉被肠道微生物利用,产生短链脂肪酸等代谢产物<sup>[67-68]</sup>,起到调节、降低血脂的作用。膳食纤维不但可以作为日常饮食与保健食品的原辅材料,而且可用于制作可食用膜,提高和保障食品的营养与健康。因此,对膳食纤维资源的持续开发、生理活性功能的深度挖掘具有广阔前景。

**1.2.6 生物活性肽及蛋白** 生物活性肽是由多个氨基酸分子脱水缩合而成的,具有特定生物活性的肽类复合物,而生物活性蛋白是由其加工变形得到的具有空间结构的多功能化合物。生物活性肽及蛋白在燕麦、荞麦、芸豆等杂粮中含量丰富且具有多种对人体有益的功效。在实际生产中,通常提取活性蛋白,使用蛋白酶解法、模拟消化道消化法等来制备活性肽。

蛋白质与多肽在生理活动中具有多种功能:a.调节血脂。苦荞蛋白通过降低血浆胆固醇,调节血脂<sup>[69]</sup>。b.调节血糖。王凤<sup>[70]</sup>研究发现燕麦多肽、荞麦多肽、青稞多肽均能抑制DPP4活性,进而有效降低餐后血糖浓度。c.有减肥的功效。张慧娟等<sup>[71]</sup>研究证明燕麦多肽使糖尿病小鼠多饮多食现象减少,体重减轻。d.抗氧化作用。付媛等<sup>[72]</sup>发现裸燕麦球蛋白源多肽可以有效提高D-半乳糖致衰老小鼠体质量及脏器指数,增强小鼠血清中SOD、GSH-Px及CAT的活性,表明其具有较强的清除自由基的能力。e.增强免疫功能。研究表明鹰嘴豆肽、豌豆肽可以增强环磷酰胺造成的免疫低下小鼠的免疫功能<sup>[73-74]</sup>。我国生物活性肽及蛋白的研究与开发稍滞后于国外,日本及欧美市场上已出现含活性肽成分的食品,对人体具有良好的保健功效。目前有关生物活性肽及蛋白的研究与开发还存在许多问题,首先,其消化、吸收、利用机理尚不清晰,其次如何对其进行有效的提取或制备,如何提高成分检测准确性等仍待解决。深入透彻的机理研究与有效的提取方法,能使生物活性肽及蛋白产业更好的发展。

## 1.2.7 其他

**1.2.7.1 多不饱和脂肪酸** 多不饱和脂肪酸(PUFA)指含有两个或两个以上双键且碳链长度为18~22个碳原子的直链脂肪酸,是有助于降低炎症,减少2型糖尿病的有效成分<sup>[75]</sup>。其中ω-3和ω-6自身无法合成,必须由食物供给,杂粮中含量丰富。苦荞麸皮中亚油酸和亚麻酸的浓度分别是面粉的2.9倍和1.7倍<sup>[76]</sup>;豌豆、菜豆、绿豆、豇豆、小豆和蚕豆普遍含有亚麻酸、亚油酸等不饱和脂肪酸<sup>[77]</sup>。

**1.2.7.2 蒂烯类** 蒂烯是一系列蒂类化合物的总称,蒂类化合物具有重要的生理活性,是研究天然产物和开发新药的重要来源。蒂烯类物质在自然界中分布广泛、种类繁多,如: $\gamma$ -蒂品烯、 $\beta$ -环柠檬醛等。蒂烯类化合物通常是白酒中风味物质的主要来源,具有呈香作用。车富红等<sup>[78]</sup>在青稞原料中检测出超过38种蒂烯类物质,种类与含量远远多于日常的酿造

原料梗高粱。高文俊<sup>[79]</sup>对青稞酒不同原酒和成品酒进行风味成分的分析时发现蒂烯类化合物,对24种青稞酒(包括原酒和成品酒)中的呈香化合物进行了定量分析,共准确定量出蒂烯类10种。王丹等<sup>[80]</sup>在研究荞麦发酵前后香气成分变化时发现,主要转化的香气成分有单蒂烯和倍单蒂烯类。除上述成分外,杂粮中尚含有皂苷、非淀粉多糖、蜕皮激素等功能成分,其独特的组成构成了杂粮功能活性的多元性,如何更好地提取、富集、开发利用这些功能活性成分值得深入挖掘。

## 2 杂粮的食用安全性

### 2.1 杂粮安全性记载

杂粮普遍具有较长食用历史,总体而言是安全可靠的,但不当或过量食用仍会引起不良反应。古籍《本草纲目》<sup>[2]</sup>中对杂粮安全性的描写可分为以下几个方面:一是杂粮的偏性引起的食用安全问题:大麦“此物有火,能生热病”、荞麦“食之难消”等,杂粮偏性使用得当,可纠正膳食失衡引起的机体健康问题,而使用不当,则使其进一步恶化。二是杂粮不当食用方式引起食用安全问题:“粟浸水至败者,损人”、绿豆“去皮则令小人壅气,盖皮寒而肉平也”;同时加工对杂粮性味也有一定的影响,采用适当方式既保证杂粮能常食,又避免产生不利的影响。如“苦荞麦,其味苦恶,农家磨捣为粉,蒸使气馏,滴去黄汁,乃可作为糕饵食之”。三是个体差异造成食用安全问题:如粟“胃冷者不宜多食”、秫“小儿不宜多食”。因此杂粮食用应考虑个体差异,否则易产生不良反应。四是杂粮的不宜搭配方式导致食用安全问题:如粟“与杏仁同食,令人吐泻”、赤小豆“作酱同饭食成口疮”。

临幊上偶有杂粮造成不良反应的报道,其中最引人关注的是荞麦与豆类杂粮的食用安全风险。由于缺乏面筋,在西方国家患有腹腔疾病和小麦不耐症的个体中食用荞麦越来越流行<sup>[81]</sup>,但是,荞麦会对小部分特殊人群产生过敏风险。1909年,美国人Smith首次在文献中提到一个对荞麦有着明显过敏反应的案例,具体表现为荨麻疹、过敏性鼻炎等<sup>[82]</sup>。随后,众多国家对这种危害展开了追踪调查。20世纪70年代,Nakamura等<sup>[83]</sup>报道了日本全国性临床调查中的169例荞麦过敏案例,发现大多数患者(86%)是幼儿,主要通过食物摄入和呼吸道传播引起过敏,其中最常见的反应是哮喘(82%),过敏性休克的病例有18例(11%)。韩国也有报道荞麦面包屑导致儿童夜间哮喘的案例<sup>[84]</sup>。我国北京协和医院分析,过敏发作的诱因为进食含荞麦食物或接触荞麦皮枕头等荞麦制品。杂豆是当前食用最为广泛的杂粮种类之一,但是豆类食物中毒造成公众卫生安全事件时有发生。陈夏威等<sup>[85]</sup>对某公司食物中毒进行调查,发现危险因素是烹煮时间不足,导致豆未能煮熟煮透,从而造成了员工恶心、呕吐、头晕、腹痛、头痛等症状。王晋斌等<sup>[86]</sup>对发病率较高的豆角中毒事件进行整理总结,

其临床表现为消化道和神经系统问题。Daverio 等<sup>[87]</sup>对因摄入羽扇豆而导致抗胆碱能综合征发作的案例进行跟踪, 患者自述视力模糊、头痛、畏光和恶心。杂粮安全问题发生的原因与症状是多种多样的, 大多数杂粮安全风险的发生具有隐匿性, 不易被发现, 对研究者而言具有挑战性, 应引起更多的关注。

## 2.2 杂粮中抗营养因子研究

杂粮中存在多种抗营养因子(AFN), 会干扰人体营养物质消化吸收和利用, 引起胃肠胀气、腹痛、腹泻、甚至食物中毒等现象<sup>[88]</sup>。一种杂粮可以同时含有多种抗营养因子, 而同种抗营养因子也会在多种杂粮中存在<sup>[89]</sup>。虽然这些抗营养因子对人体有潜在危害, 但随着研究的深入, 利用这些抗营养因子的特性, 反而可以开发成抗癌药物、杀虫抑菌剂等有利产品。目前研究较为广泛的抗营养因子包括植物凝集素<sup>[90]</sup>、皂苷、植酸、胰蛋白酶抑制剂<sup>[91]</sup>等。

**2.2.1 植物凝集素** 植物凝集素是一种非抗体、非源于免疫反应的糖蛋白或糖结合蛋白, 最大的特征是能与红细胞特异性糖基结合, 使血红细胞凝集<sup>[92-93]</sup>, 具有抑制蛋白质合成和细胞毒性的作用<sup>[94]</sup>。植物凝集素种类繁多。豆类是研究较为透彻的品种之一, 刀豆<sup>[95]</sup>、蚕豆<sup>[96]</sup>、扁豆<sup>[85]</sup>中均发现含有丰富凝集素。凝集素除了具有特异性结合能力外, 还可以诱导细胞的凋亡与自噬, 具有一定的防御功能<sup>[97]</sup>。于雪慧<sup>[92]</sup>以凝集活性为指标, 发现奶花芸豆中凝集素的特异性活力为 $(13.26 \pm 0.26) \times 10^3$  HU/mg。

**2.2.2 皂苷** 皂苷是苷元为三萜或螺旋甾烷类化合物的一类糖苷, 皂苷具有细胞毒性, 通过不同机制诱导细胞凋亡<sup>[98]</sup>。研究表明皂苷具有热不稳定性, 易受环境条件的影响<sup>[99]</sup>。皂苷广泛存在于杂粮中, 如苦荞<sup>[100]</sup>、蚕豆、鹰嘴豆、藜麦<sup>[101]</sup>。皂苷可以抑制肿瘤坏死因子(TNF- $\alpha$ )和白细胞介素(IL-6)等炎症细胞因子。苦荞皂苷可以起到降血糖的作用<sup>[100]</sup>。藜麦皂苷可以起到抗炎效果, 具有抑制细菌和病毒生长繁殖的能力<sup>[102]</sup>。智秀娟等<sup>[103]</sup>对提取苦荞皂苷的热回流法进行优化, 测得总皂苷得率最大值为 22.82 mg/g。

**2.2.3 植酸** 植酸又称肌酸六磷酸, 它能够结合必需的膳食矿物质以及蛋白质和淀粉, 从而降低其在人体中的生物利用度<sup>[104]</sup>。近期研究表明, 在钙摄入不足的情况下, 大量摄入植酸会造成肠道的磷酸盐过载, 导致晶体肾病相关的矿物质骨骼疾病<sup>[105]</sup>。植酸主要存在于植物的种子中, 其中以豆科植物的种子、谷物的麸皮和胚芽中含量最高。在常见的豆类中发现最多的植酸约 2 g/100 g 干物质, 另一方面, 荞麦面食中植酸含量最低( $< 1$  g/100 g)<sup>[106]</sup>。还有研究发现植酸可以抑制蛋白酶和淀粉酶<sup>[107]</sup>, 在一定剂量范围内增加抗氧化活性<sup>[108]</sup>。

**2.2.4 胰蛋白酶抑制剂** 胰蛋白酶抑制剂是由氨基酸组成的多肽或小分子蛋白质<sup>[91]</sup>。胰蛋白酶抑制剂

会强烈抑制胰蛋白酶活性, 从而降低膳食蛋白的消化和吸收。多种杂粮如豇豆、绿豆中广泛存在胰蛋白酶抑制剂<sup>[109]</sup>。阮景元<sup>[110]</sup>从苦荞麦种子中分离出一种胰蛋白酶抑制剂(FtTI)。一方面, 胰蛋白酶抑制剂可以保护植物免受致病性攻击<sup>[111]</sup>, 另一方面, 来自荞麦中的蛋白酶抑制剂 rBTI 具有一定的抗肿瘤作用, 能明显抑制肝癌、乳腺癌等肿瘤细胞的增殖, 并诱导其凋亡或自噬<sup>[112]</sup>。

## 3 展望

杂粮在我国有长久的食用历史, 资源丰富, 种类繁多, 具有优质的营养价值, 富含多酚、糖醇、蒽醌等功能活性成分, 在我国饮食结构中具有重要地位。当前我国以精细米面为主食的饮食结构易引起诸如糖尿病、高血压等多种慢性疾病。现代人根据《黄帝内经》<sup>[1]</sup>倡导“合理搭配, 谨和五味”的膳食平衡饮食理念, 提出多元化合理饮食搭配是保证人体健康的重要前提, 杂粮的营养功能重新受到人们认可与重视。因此, 杂粮产业具有广泛的市场前景。

当前, 杂粮已被广泛研究与应用于食品保健行业, 例如杂粮中多酚、糖醇等功能成分的提取工艺、功能作用及作用机制等。然而, 多种原因限制了杂粮产业的发展。一方面, 我们对杂粮的营养功能及安全、作用机制的认识仍十分有限, 目前市场上有各类杂粮米、面、糕点、茶、酒、粥等产品, 往往只能满足营养成分的“量”而忽视了“质”, 无法达到消费者的保健期待。因此, 随着糖尿病、高血压等慢性疾病受到大众广泛关注, 精准营养食品的开发与研制越发迫切。另一方面, 膳食干预成为当代人预防疾病的首选, 食物过敏与中毒事件发生率越来越高, 杂粮安全领域的问题应受关注, 如何控制杂粮中抗营养因子和致敏原对人体的危害成为新的研究方向。

结合肠道微生态理论、多组学等新技术理论的发展, 深入挖掘杂粮中的更多营养功能, 阐明杂粮的作用机制, 能够为合理开发杂粮资源提供理论基础, 为后续研制生产均衡营养或针对特殊人群的保健食品提供依据。选育缺乏某种抗营养因子杂粮, 是解决杂粮安全性问题的方法之一。但是这种方法极有可能改变物种的生长发育, 可能会带来潜在危害。研究发现单独或组合使用多种传统方法和技术可降低抗营养因子的水平, 如发酵、发芽等。这些方法的研究, 需要与现代加工方式如高静水压技术相结合, 以获得更高效、可靠的条件。

## 参考文献

- [1] 田代华. 黄帝内经素问 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2005: 48-48.
- [2] (明) 李时珍. 本草纲目 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1982: 1434-1570.
- [3] Zhang X, Zhang M, Zhao Z P, et al. Geographic variation in prevalence of adult obesity in China: Results from the 2013-2014 national chronic disease and risk factor Surveillance [J]. Annals of

- Internal Medicine, 2020, 172(4): 291–291.
- [4] 张君梅. 杂粮功能醋粉片制备及体内功能研究 [D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [5] Buja A, Grotto G, Brocadello F, et al. Primary school children and nutrition: lifestyles and behavioral traits associated with a poor-to-moderate adherence to the Mediterranean diet. A cross-sectional study [J]. European Journal of Pediatrics, 2020, 179(5): 827–834.
- [6] 杨月欣. 中国食物成分表 [M]. 北京: 北京医科大学出版社, 2018: 48–55.
- [7] Deean E C, Walter J. The fiber gap and the disappearing gut microbiome: Implications for human nutrition [J]. Trends in Endocrinology and Metabolism, 2016, 27(5): 239–242.
- [8] 王蕾蕾, 何芳, 樊慧茹, 等. 高抗性淀粉大米血糖生成指数测定及对糖尿病患者血糖调控的干预研究 [J]. 营养学报, 2017, 39(2): 197–199.
- [9] Liu H, Guo X, Li Y, et al. *In vitro* digestibility and changes in physicochemical and textural properties of tartary buckwheat starch under high hydrostatic pressure [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 189: 64–71.
- [10] 闫贝贝. 苦荞抗性淀粉对血脂代谢紊乱小鼠肠道菌群调节作用的研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018.
- [11] 李恒, 刘静, 孙桂菊, 等. 抗性淀粉、脂肪和蛋白质对淀粉体外消化速度的影响 [J]. 卫生研究, 2007(3): 308–310.
- [12] 张洁, 张根义. 燕麦全麦粉中淀粉消化性的研究 [J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(2): 171–178.
- [13] Tang Y, Li X, Zhang B, et al. Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes [J]. Food Chemistry, 2015, 166: 380–388.
- [14] Multari S, Pihlava J M, Ollennu-Chuasam P, et al. Identification and quantification of avenanthramides and free and bound phenolic acids in eight cultivars of husked oat (*Avena sativa* L) from Finland [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(11): 2900–2908.
- [15] Hao M, Beta T. Qualitative and quantitative analysis of the major phenolic compounds as antioxidants in barley and flaxseed hulls using HPLC/MS/MS [J]. Journal of Science of Food Agriculture, 2012, 92(10): 2062–2068.
- [16] 贺胜. 麻子壳多酚类物质抗氧化活性研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [17] Guo X D, Ma Y J, Parry J, et al. Phenolics content and antioxidant activity of tartary buckwheat from different locations [J]. Molecules, 2011, 16(12): 9850–9867.
- [18] 李文婷. 六种豆类中不同结合态多酚组成、胃肠道生物可接受率及其抗氧化活性研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [19] 陈长应, 朱桂红. 黑荞麦中花青素的提取及含量测定 [J]. 粮食与饲料工业, 2017(1): 64–68.
- [20] 董晶, 张焱, 曹赵茹, 等. 荞麦总黄酮的超声波法提取及抗氧化活性 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(4): 267–269.
- [21] 胡一晨, 赵钢, 秦培友, 等. 荞麦活性成分研究进展 [J]. 作物学报, 2018, 44(11): 1579–1591.
- [22] Roberta, Masella, Claudio, et al. Effects of dietary virgin olive oil phenols on low density lipoprotein oxidation in hyperlipidemic patients [J]. Lipids, 2001, 36(11): 1195–1202.
- [23] 肖杰, 王曦, 侯粲, 等. 苦荞调控糖脂代谢作用及其生物学机制研究进展 [J]. 食品科学, 2019, 40(21): 343–349.
- [24] 周小理, 王越, 赵燊, 等. 苦荞对高脂膳食诱导小鼠血脂代谢及组织氧化还原的影响 [J]. 食品科学, 2018, 39(3): 188–192.
- [25] Adebamowo C A, Cho E, Sampson L, et al. Dietary flavonols and flavonol-rich foods intake and the risk of breast cancer [J]. International Journal of Cancer, 2005, 114(4): 628–633.
- [26] Guo W, Wise M L, Collins F W, et al. Avenanthramides, polyphenols from oats, inhibit IL-1beta-induced NF-kappaB activation in endothelial cells [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2008, 44(3): 415–429.
- [27] 王璇璇, 丁雪洁, 任素萍, 等. 黑青稞籽皮类黄酮的提取及其对缺氧损伤细胞的保护作用 [J]. 中国医药导报, 2014, 11(21): 90–94.
- [28] Steadman K J, Burgoon M S, Schuster R L, et al. Fagopyritols, D-chiro-inositol, and other soluble carbohydrates in buckwheat seed milling fractions [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(7): 2843–2847.
- [29] 曹文明, 张燕群, 苏勇. 荞麦手性肌醇提取及其降糖功能研究 [J]. 粮食与油脂, 2006(1): 22–24.
- [30] Ostlund R E, Jr, McGill J B, et al. D-chiro-Inositol metabolism in diabetes mellitus [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1993, 90(21): 9988–9992.
- [31] 刘瑞敏. 苦荞降糖成分的提取与药效初步研究 [D]. 成都: 四川师范大学, 2012.
- [32] Horbowicz M, Obendorf R L. Seed desiccation tolerance and storability: Dependence on flatulence-producing oligosaccharides and cyclitols—review and survey [J]. Deed Science Research, 1994, 4(4): 38–405.
- [33] Yao Y, Cheng X-Z, Ren G-X. Contents of D-chiro-inositol, vitexin, and isovitexin in various varieties of mung bean and its products [J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(11): 1710–1715.
- [34] 张泽生, 裴雅, 高云峰, 等. D-手性肌醇的研究与开发 [J]. 中国食品添加剂, 2013(3): 77–83.
- [35] Cheng F, Han L, Xiao Y, et al. D- chiro-Inositol ameliorates high fat diet-induced hepatic steatosis and insulin resistance via PKCEpsilon-PI3K/AKT pathway [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(21): 5957–5967.
- [36] Hu Y, Zhao Y, Ren D, et al. Hypoglycemic and hepatoprotective effects of D-chiro-inositol-enriched tartary buckwheat extract in high fructose-fed mice [J]. Food Function, 2015, 6(12): 3760–3769.
- [37] 么杨. 绿豆降血糖活性研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
- [38] 包塔娜, 周正质, 张帆, 等. 苦荞麦麸皮的化学成分研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2003(2): 116–117.
- [39] 卫星星, 李银涛, 靳月琴. 苦荞籽壳化学成分的研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2013, 25(1): 44–46.
- [40] Peng L X, Wang J B, Hu L X, et al. Rapid and simple method for the determination of emodin in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) by high-performance liquid chromatography coupled to a

- diode array detector[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(4): 854–857.
- [41] 吴兴强. 加速溶剂萃取-高效液相色谱检测农作物种农药残留与蒽醌类活性物质[D]. 保定: 河北大学, 2014.
- [42] Wu X, Ge X, Liang S, et al. A novel selective accelerated solvent extraction for effective separation and rapid simultaneous determination of six anthraquinones in tartary buckwheat and its products by UPLC-DAD[J]. Food Analytical Methods, 2014, 8(5): 1124–1132.
- [43] 纪晓萍, 张炳丰, 方东生. 大黄提取物中游离蒽醌对实验性便秘小鼠的泻下作用[J]. 黑龙江中医药, 2019, 48(6): 336–337.
- [44] 蔡友德, 何前松, 樊梓媛, 等. 基于抗氧化作用探讨大黄游离蒽醌类成分对脑缺血再灌注损伤的脑保护机制[J]. 贵阳中医学院学报, 2019, 41(4): 5–10.
- [45] 朱艺, 李琛, 李洪亮, 等. 首乌中相关蒽醌类化合物抗癌作用的研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(18): 196–205.
- [46] Aminu M, Auwal I M, Nasir T, et al. Antidiabetic potential of anthraquinones: A review[J]. Phytotherapy research: PTR, 2020, 34(3): 48504–48504.
- [47] 鹿成稻. 1.1 类新药“富马酸替诺福韦双特戊酯”和鹰嘴豆总生物碱抗肝炎药理学研究[D]. 西安: 第四军医大学, 2012.
- [48] Singh R, De S, Belkheir A. *Avena sativa* (Oat), a potential neutraceutical and therapeutic agent: An overview[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(2): 126–144.
- [49] Bratt K, Sunnerheim K, Bryngelsson S, et al. Avenanthramides in oats (*Avena sativa* L.) and structure-antioxidant activity relationships[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(3): 594–600.
- [50] 刘树兴, 李浩恒, 任益平. 响应面法优化藜麦中生物碱的提取工艺[J]. 中国调味品, 2020, 45(2): 98–103.
- [51] 吴玉杰, 袁娟丽, 陈红兵. 燕麦生物碱的结构与功能研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 328–333.
- [52] Wang D, Wise M L, Li F, et al. Phytochemicals attenuating aberrant activation of beta-catenin in cancer cells[J]. PLoS One, 2012, 7(12): e50508–e50508.
- [53] 郭彩珍, 褚盼盼, 乔元彪. 绿豆生物碱的提取及抑菌作用的研究[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(7): 987–988, 990.
- [54] 肖晶晶, 刘静雪, 高婷婷, 等. 荞麦膳食纤维加工技术研究进展[J]. 粮食问题研究, 2018(6): 34–37.
- [55] 王锐. 酶法降解糜米中蛋白的初步研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [56] 张艳莉, 王颖, 王迪, 等. 荸荠膳食纤维超声辅助酶法提取工艺优化及特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 201–205.
- [57] 洛桑旦达, 强小林. 青稞特有营养成份分析与开发利用现状调查研究报告[J]. 西藏科技, 2001(8): 54–64.
- [58] 刘文婷, 杨才, 张新军, 等. 中国不同地区燕麦营养品质及相关性分析[J]. 农业科技通讯, 2019(12): 151–155, 274.
- [59] 周一鸣, 李保国, 崔琳琳, 等. 荞麦淀粉及其抗性淀粉的颗粒结构[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 25–27.
- [60] 李一博, 冯进, 李春阳, 等. 蚕豆淀粉与其抗性淀粉理化性质的比较[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 26–32.
- [61] 曹承嘉, 缪书婷, 张晓晨, 等. 压热冷却循环处理制备青稞抗性淀粉的工艺优化及其特性研究[J]. 食品科技, 2020, 45(3): 253–258.
- [62] 张若辰. 高粱中抗性淀粉的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014.
- [63] Aoe S, Ichinnose Y, Kohyama N, et al. Effects of high beta-glucan barley on visceral fat obesity in Japanese individuals: A randomized, double-blind study[J]. Nutrition, 2017, 42: 1–6.
- [64] Beck E J, Tosh S M, Batterham M J, et al. Oat beta-glucan increases postprandial cholecystokinin levels, decreases insulin response and extends subjective satiety in overweight subjects[J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2009, 53(10): 1343–1351.
- [65] 董吉林, 林娟, 申瑞玲, 等. 高粱淀粉及抗性淀粉对高脂饮食诱导大鼠体脂分布研究[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(10): 14–17.
- [66] 张瑞, 吕梅霞, 韩加. 鹰嘴豆膳食纤维对高脂血症大鼠肠道菌群的影响[C]//营养研究与临床实践——第十四届全国营养科学大会暨第十一届亚太临床营养大会、第二届全球华人营养科学大会论文摘要汇编. 北京: 中国营养学会, 2019: 405–406.
- [67] Kelly J, Ryan S, Mckinnon H, et al. Dietary supplementation with a type 3 resistant starch induces butyrate producing bacteria within the gut microbiota of human volunteers[J]. Appetite, 2015, 91: 438–438.
- [68] 董吉林, 王雷. 膳食纤维对肠道微生物及机体健康影响的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2019(1): 36–40.
- [69] Zhang C, Zhang R, Li Y M, et al. Cholesterol-lowering activity of tartary buckwheat protein[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(9): 1900–1906.
- [70] 王凤. 燕麦多肽的结构特征及 DPP4 抑制作用[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [71] 张慧娟, 黄莲燕, 尹梦, 等. 燕麦多肽降血糖功能的研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(10): 360–363, 384.
- [72] 孙桂菊, 柳和春, 许登峰, 等. n-3 多不饱和脂肪酸的抗炎作用和 2 型糖尿病[J]. 健康教育与健康促进, 2020, 15(2): 116–119.
- [73] 张敏佳, 刘文颖, 贾福怀, 等. 豌豆肽对环磷酰胺致免疫抑制小鼠免疫功能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(8): 135–140.
- [74] 李睿珺, 秦勇, 周雅琳, 等. 鹰嘴豆肽对免疫低下小鼠免疫功能的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 133–139.
- [75] 付媛, 张美莉, 高韶辉, 等. 裸燕麦球蛋白源多肽对 D-半乳糖致衰老小鼠抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 137–141.
- [76] Peng L X, Zou L, Tan M L, et al. Free amino acids, fatty acids and phenolic compounds in tartary buckwheat of different hull colour[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2017, 35(No.3): 214–222.
- [77] 李文婷, 邹安迪, 李红艳, 等. 黑色小扁豆中不同结合态酚类含量、花青素组成及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报, 2020, 20(2): 299–306.
- [78] 车富红, 冯声宝, 李善文, 等. 几个青稞主产区不同青稞品种的微量成分差异分析[J]. 酿酒科技, 2019(11): 113–118.
- [79] 高文俊. 青稞酒重要风味成分及其酒醅中香气物质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [80] 王丹, 张岚, 王佳鑫, 等. HS-SPME-GC-MS 法分析发酵过

- 程中荞麦和小麦面团香气成分变化[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 207–217.
- [81] Fok J S, Kette F, Smith W B, et al. Buckwheat allergy in Australia[J]. Internal Medicine Journal, 2019, 49(12): 1552–1553.
- [82] HI S. Buckwheat-poisoning with report of a case in man(1909)[J]. Allergy and Asthma Proceedings, 1990, 11(4): 193–196.
- [83] Nakamura S, Yamaguchi M Y. Studies on buckwheat allergose report 2: Clinical investigation on 169 cases with the buckwheat allergose gathered from the whole country of Japan[J]. Allerg Immunol (Paris), 1974, 20(21): 457–465.
- [84] Lee S Y, Lee K S, Hong C H, et al. Three cases of childhood nocturnal asthma due to buckwheat allergy[J]. Allergy, 2001, 56(8): 763–766.
- [85] 陈夏威, 何伦发, 郭艳, 等. 一起扁豆食物中毒的现场流行病学调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(S1): 62–65.
- [86] 王晋斌, 侯书文, 张丽萍. 56例豆角中毒患者的临床救治[J]. 中国医药指南, 2015, 13(13): 185–186.
- [87] Daverio M, Cavicchioli M E, Grotto P, et al. Bitter lupine beans ingestion in a child: A disregarded cause of acute anticholinergic toxicity[J]. European Journal of Pediatrics, 2014, 173(12): 1549–1551.
- [88] 梁叶星, 张玲, 高飞虎, 等. 杂粮中的抗营养因子检测技术研究进展[J]. 南方农业, 2016, 10(34): 39–43.
- [89] Shang R, Wu H, Guo R, et al. The diversity of four anti-nutritional factors in common bean[J]. Horticultural Plant Journal, 2016, 2(2): 97–104.
- [90] 赵金龙. 质子化诱导调控黑芸豆凝集素蛋白致敏性的构效关系研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [91] 葛平珍, 余莉, 王昭礼, 等. 荸荠籽粒中胰蛋白酶抑制剂的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 348–351.
- [92] 于雪慧. 新疆奶花芸豆中  $\alpha$ -淀粉酶抑制剂及凝集素的提取、分离、鉴定[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [93] 李笑梅, 韩春然. 菜豆凝集素血凝活性与品种的关系及稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2009, 9(6): 66–71.
- [94] 申剑, 崔晓东, 李玉英, 等. 苦荞凝集素的纯化及性质鉴定[J]. 食品科学, 2015, 36(3): 1–5.
- [95] 陈婧宜. 刀豆凝集素提取分离纯化及性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [96] 高泽磊, 田童童, 张建. 新疆白芸豆中凝集素的提取及纯化工艺[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 191–196.
- [97] 鲍锦库. 植物凝集素的功能[J]. 生命科学, 2011, 23(6): 533–540.
- [98] Moses T, Papadopoulou K K, Osbourn A. Metabolic and functional diversity of saponins, biosynthetic intermediates and semi-synthetic derivatives[J]. Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology, 2014, 49(6): 439–462.
- [99] 张静, 姜淑卿, 张书婧, 等. 食用豆科植物皂苷和植物凝集素毒性试验[J]. 预防医学, 2019, 31(7): 754–756.
- [100] 黄海燕. 苦荞黄酮与皂苷的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [101] 吴英思, 郭占斌, 杜文亮, 等. 荞麦脱出物的物料特性研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 184–189.
- [102] 吴立根, 屈凌波, 王岸娜, 等. 加工方式对藜麦营养及生物活性影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(2): 10–13.
- [103] 智秀娟, 李栋, 曹新杰, 等. 苦荞总皂苷的提取工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(7): 97–103.
- [104] Phillippe B Q. Inositol phosphates in foods[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2003, 45: 1–60.
- [105] Kim O H, Booth C J, Choi H S, et al. High-phytate/low-calcium diet is a risk factor for crystal nephropathies, renal phosphate wasting, and bone loss[J]. Elife, 2020: 9.
- [106] Petra Vojtíšková, Stanislav Kráčmar. Crude protein, fibre and phytic acid in vitro digestibility of selected legume and buckwheat samples[J]. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2013, 61(1): 227–232.
- [107] Ruales J, Nair B M. Saponins, phytic acid, tannins and protease inhibitors in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) seeds[J]. Food Chemistry, 1993, 48(2): 137–143.
- [108] 陈园, 仇农学, 熊健. 植酸的体内抗氧化活性研究[J]. 现代食品科技, 2011, 27(2): 131–134.
- [109] 樊艳平. 绿豆胰蛋白酶抑制剂的提取纯化及抗豆象机理研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
- [110] 阮景元. 苦荞麦胰蛋白酶抑制剂的分离纯化、基因克隆表达及其抗病虫害研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- [111] Chan Y S, Zhang Y, Ng T B. Brown kidney bean bowman-birk trypsin inhibitor is heat and pH stable and exhibits anti-proliferative activity[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2013, 169(4): 1306–1314.
- [112] Li Y Y, Zhang Z, Wang Z H, et al. rBTI induces apoptosis in human solid tumor cell lines by loss in mitochondrial transmembrane potential and caspase activation[J]. Toxicology Letters, 2009, 189(2): 16–75.