

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240923003

# 藜麦营养组分及功能活性研究进展

郭子渊<sup>1,2</sup>, 邓晓青<sup>1\*</sup>, 平椿源<sup>3</sup>, 吴晓蒙<sup>2</sup>, 李想<sup>1</sup>, 李道通<sup>2</sup>, 肖鑫鑫<sup>1</sup>, 孔瑞雪<sup>1</sup>

(1. 四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院, 成都 610100; 2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 3. 河南科技学院食品科学与技术学院, 新乡 453003)

**摘要:** 近年来, 全谷物食品由于具有更高的营养价值和健康益处, 是消费者在健康饮食方面关注的热点。藜麦因含有全面且均衡的营养成分和功能活性物质, 对人体的营养和健康至关重要。藜麦在营养、经济、医用及饲用方面较高的价值引起了消费者的青睐。全面系统地了解藜麦中主要营养物质和功能活性成分, 对于深入探索其作用机制以及开发药食同源产品至关重要。为提高消费者对藜麦的认知以及藜麦的加工生产水平, 本文重点阐述了营养及功能活性物质的构成、性质以及提取方法, 分析了营养成分的功能活性作用及其机制, 剖析了藜麦在加工过程中亟待解决的问题和未来发展方向, 以期藜麦全植株在食品行业、医疗保健和工业领域的加工和应用提供理论依据和技术支撑。

**关键词:** 藜麦; 营养成分; 功能活性物质; 生理活性; 藜麦副产物

## Research progress on nutritional functional components and physiological activity of *Chenopodium quinoa* Willd.

GUO Zi-Yuan<sup>1,2</sup>, DENG Xiao-Qing<sup>1\*</sup>, PING Chun-Yuan<sup>3</sup>, WU Xiao-Meng<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, LI Dao-Tong<sup>2</sup>, XIAO Xin-Xin<sup>1</sup>, KONG Rui-Xue<sup>1</sup>

(1. College of Culinary and Food Science Engineering, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;  
2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
3. School of Food Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

**ABSTRACT:** Whole grains food has more nutritional value and health benefits, which has become the focus of consumer's attention in healthy eating in recent years. *Chenopodium quinoa* Willd. contains comprehensive and balanced nutrition components and bioactive components, which are essential to human nutrition and health, with higher nutritional value, economic value, medical value and feeding value, thus, it is more and more favoured by consumers. Therefore, it is of great significance to understand the main nutrients and functional active ingredients in *Chenopodium quinoa* Willd. comprehensively and systematically, which is essential for the in-depth exploration of its mechanism and the development of the products of medicinal and edible. In order to improve consumers' awareness of *Chenopodium quinoa* Willd. and the processing and production level of *Chenopodium quinoa* Willd., this article

**基金项目:** 四川省科技计划项目(25QNJJ2342)、四川旅游学院校级科研项目(2024SCTUZZ03)、四川旅游学院“青年突击队”博士训练营专项科研项目(2023SCTUBSZD04)、校级人才培养质量和教学改革项目(JG2023013)

**Fund:** Supported by the Sichuan Province Science and Technology Plan (25QNJJ2342), the Scientific Research Project of Sichuan Tourism University (2024SCTUZZ03), the Special Project for “Youth Commando” Doctoral Training Camp of Sichuan Tourism University (2023SCTUBSZD04), and the Talent Training Quality and Teaching Reform Project of Sichuan Tourism University (JG2023013)

\*通信作者: 邓晓青, 讲师, 主要研究方向为食品营养与加工。E-mail: dengxiaqing0@163.com

\*Corresponding author: DENG Xiao-Qing, Lecturer, College of Culinary and Food Science Engineering, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China. E-mail: dengxiaqing0@163.com

focused on the composition, properties, and extraction methods of nutritional and functional active substances, analyzed the functional activity effects and mechanisms of nutritional components, and dissected the urgent problems and future development directions of *Chenopodium quinoa* Willd. in the processing process, in order to provide theoretical basis and technical support for the processing and application of *Chenopodium quinoa* Willd. whole plants in the food industry, healthcare, and industrial fields.

**KEY WORDS:** *Chenopodium quinoa* Willd.; nutrition components; bioactive components; physiological activity; *Chenopodium quinoa* Willd. by-product

## 0 引言

随着经济的快速发展,消费者逐渐注重饮食多元化,追求食品营养素精细化。杂粮在维持健康的生活方式和降低患病风险方面发挥着重要的作用,市场调研数据显示,2023年杂粮的市场需求量已达到3.5亿t,同比增长了8.5%,可见消费者对健康杂粮的需求逐年上升。藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)是苋科藜属的一年生双子叶草本作物,被联合国粮食及农业组织推荐为最适合人类食用的“全营养食品”,含有能满足人体基本生理需求的营养成分和丰富的植物化学成分,如蛋白质、碳水化合物、皂苷、植物甾醇、酚类化合物、生物活性肽、多糖、纤维素<sup>[1]</sup>等,其含量均高于传统谷物,具有优越的抗菌活性<sup>[2]</sup>、抗氧化活性<sup>[3]</sup>、体外降血脂和尿酸活性<sup>[4]</sup>、抗高血压活性<sup>[5]</sup>等功能,对人体新陈代谢、糖尿病及心血管疾病具有有益作用。目前藜麦已被广泛应用于食品行业,例如肉制品、膨化食品、即食食品、保健食品和饮片<sup>[6]</sup>等。目前,藜麦生物活性成分已受到国内外研究人员的大量关注,具有广泛的应用前景。我国藜麦产业起步较晚,有关藜麦功能性成分,如皂甙、黄酮、多酚、色素等的开发及应用方面尚缺乏深入研究<sup>[7]</sup>,同时消费者对其营养价值了解不深入,造成了藜麦产品开发力度较小。因此,为了充分了解藜麦的营养价值和生物活性,加大对藜麦深加工的研究以及开发高附加值产品,本研究梳理了藜麦中主要营养成分和生物活性物质,阐述了藜麦的生理活性作用、加工对藜麦品质的影响和藜麦资源综合利用的研究进展,旨在为藜麦全谷物食品品质调控提供理论和方法指导,以期在藜麦在食品、医药等领域的未来应用提供参考。

## 1 藜麦营养组分和功能活性成分

### 1.1 淀粉

淀粉是藜麦的主要成分之一,含量约为32%~69.7%<sup>[8]</sup>。藜麦淀粉颗粒大小为0.4~1.5 μm,平均摩尔质量为 $1.13 \times 10^6$  g/mol,高于小麦淀粉( $5.5 \times 10^6$  g/mol)但低于大米淀粉( $0.52 \times 10^8$  g/mol)<sup>[9]</sup>,与传统谷物相比,具有优越的抗老化性能、高溶胀力以及高水溶性指数<sup>[10]</sup>。藜麦淀粉由

直链淀粉和支链淀粉两种主要形式组成。WU等<sup>[11]</sup>对11个纯藜麦品种和2个商业藜麦品种中淀粉的性质进行表征,其中每100g藜麦种子中总淀粉含量为53.2~75.1g,表观直链淀粉含量在2.7%~16.9%,总直链淀粉含量为4.7%~17.3%,藜麦直链淀粉含量较低,支链淀粉较多<sup>[12]</sup>,因此藜麦淀粉用途广泛。由于淀粉含量与加工产品的质构特性密切相关,是决定食品蒸煮品质的重要因素之一。研究认为,藜麦中总淀粉含量与黏着性呈显著负相关,直链淀粉含量越高,越易形成凝胶,可导致米饭蒸煮过程中吸水量较少,加工产品食用品质表现出更硬、更黏和更耐嚼的质地。潘自强等<sup>[13]</sup>采用碱法提取藜麦淀粉并加入交联剂和增强剂制备淀粉膜,所制备的薄膜阻隔性能、透气性能良好,可食用且绿色环保,可广泛应用于食品包装中。GÓMEZ等<sup>[14]</sup>将藜麦淀粉作为壁材,将香草醛作为芯材进行包埋,且包埋率较高,包埋效果好。此外,藜麦淀粉微球加入化妆品中后具有优越吸附性能,在化妆品行业具有广泛的应用前景。

### 1.2 蛋白质和氨基酸

新鲜藜麦种子中蛋白质含量较高,平均蛋白质含量在12%~18%之间,高于大麦、玉米、大米等传统作物,接近小麦<sup>[15]</sup>(表1)。不同颜色品种之间的蛋白质含量存在显著差异,可能是受内源性因素(例如基因差异)和外源性因素(例如种植条件、储存形式)等影响。藜麦中含有17种氨基酸,包括人体必需的8种氨基酸和9种非必需氨基酸,且各种氨基酸比例适当。目前研究认为,藜麦中氨基酸含量符合人体对氨基酸的基本需求,且含量均高于常规谷物<sup>[16]</sup>,尤其是限制性氨基酸赖氨酸、蛋氨酸和苏氨酸等<sup>[17]</sup>,因此藜麦蛋白被认为是优质蛋白质。藜麦蛋白主要由清蛋白和球蛋白组成,占总蛋白质含量的44%~77%,醇溶蛋白和谷蛋白<sup>[18]</sup>含量较少,其组成与谷类蛋白相似,是无麸质谷物替代品的选择之一,同时也可以作为乳制品的优质替代品,因此藜麦是素食主义者的良好选择。藜麦蛋白有较好的稳定性是基于其空间结构中存在的大量二硫键,因此藜麦蛋白也不易受加工条件的影响,可以很好地保持其原有营养特性和功能特性。

目前,藜麦蛋白的提取方法有碱提酸沉法、酶辅助提取法和盐法分离等。研究发现,不同pH条件下,藜麦蛋白质的溶解度和稳定性差异较大,强碱条件下提取时蛋白质

更容易变性, 蛋白质的空间结构遭到破坏, 导致其溶解性和热稳定性降低<sup>[19]</sup>。徐铭悦等<sup>[19]</sup>采用超声辅助碱提酸沉法提取藜麦麸皮中的蛋白质, 藜麦蛋白的纯度可达 80.74%, 提取率比常规碱法提取高 5.51%, 同时有效改善了藜麦蛋白的结构和功能特性。

表 1 藜麦与传统谷物营养成分比较<sup>[10,14-16]</sup>  
Table 1 Comparison of nutritional composition between *Chenopodium quinoa* Willd. and traditional cereals<sup>[10,14-16]</sup>

营养成分	藜麦	米	小麦	大麦	玉米
蛋白质/g	13.1~16.7	6.8	11.3	9.42	9.42
脂质/g	5.5~7.4	0.7	1.7	1.3	4.74
纤维/g	7.0~11.7	0.6	12.2	15.6	7.3
灰分/g	2.7~3.8	0.5	1.5	1.13	0.67
碳水化合物/g	59.9~74.7	79.7	63.7	77.72	74.26
能量/kcal	357~368	354	340	352	365

### 1.3 脂肪

藜麦脂肪作为重要的营养成分, 其含量约在 5.5%~7.4%之间, 高于小麦(1.7%)、大米(0.7%)<sup>[20-21]</sup>。藜麦中脂肪酸包括必需脂肪酸和非必需脂肪酸, 种类多达 30 种, 其中多不饱和脂肪酸含量较高, 约占脂肪酸总量的 82.7%, 能显著降低血液胆固醇、甘油三酯、血液黏稠度, 增加胰岛组织  $\beta$  细胞活性。不饱和脂肪酸主要包括亚油酸和亚麻酸, 分别代谢为花生四烯酸和二十碳五烯酸 (eicosapentaenoic acid, EPA) 或二十二碳六烯酸 (docosahexaenoic acid, DHA), 对于抗炎和提高免疫功能具有重要意义<sup>[22]</sup>; 其次是单不饱和脂肪酸。含量最少的是饱和脂肪酸, 棕榈酸(9.59%)是脂肪酸中含量最多的饱和脂肪酸。目前有研究证明脂肪酸在降低高血脂患者的血脂水平和预防心血管疾病方面具有重要意义, 因此, 藜麦的脂肪酸组成符合我国居民健康饮食的选择。

藜麦中脂肪含量和脂肪酸组成会因不同品种、环境、处理手段等因素而异。研究发现, 微波处理对藜麦脂肪酶活性和风味特性有显著改善作用。目前, 关于藜麦脂肪的加工特性研究相对较少, 未来可以加强藜麦脂肪的研究, 通过改善藜麦风味和品质, 来掩盖皂苷带来的苦味。

### 1.4 功能活性成分

#### 1.4.1 多酚

多酚类化合物是藜麦在生长过程中产生的次生代谢物, 目前已鉴定的多达 26 种, 以酚酸(阿魏酸和香草酸及其衍生物)和类黄酮化合物(槲皮素、山奈酚和糖苷)为主, 阿魏酸-4-葡萄糖苷是主要的酚类化合物, 含量在 132~161 mg 之间<sup>[23]</sup>。REPO 等<sup>[24]</sup>研究发现藜麦中含有 16.8~59.7 mg/100 g 的酚酸类似物, 包括咖啡酸、阿魏酸、对香豆酸、对羟基苯甲酸和香草酸。藜麦中酚类化合物的含量与品种有关, 例如原儿茶酸和对香豆酸-4-葡萄糖苷只在黑色和红色藜麦中

存在, 且黑色藜麦中的总酚类化合物含量高于白藜麦和红色藜麦。青海白藜中总黄酮的含量为 6.479 mg/g, 化学组成主要为槲皮素和山奈酚, 此外含有少量的杨梅素和异鼠李素<sup>[25]</sup>。藜麦多酚的抗氧化、降血糖、降血脂、防治心血管疾病等多种生理活性现已被广泛认可。但藜麦多酚的提取常常需要借助超声或微波等手段, 多酚提取工艺、纯化工艺及功能活性是未来研究的重点。

#### 1.4.2 皂苷

藜麦皂苷是一类重要的生物活性成分, 主要由皂苷元和糖构成<sup>[26]</sup>, 占藜麦总皂苷含量的 68%, 皂苷含量平均值为 93.66 mg/100 g<sup>[27]</sup>, 高于传统谷物如大豆和燕麦<sup>[28]</sup>。研究人员发现在藜麦总皂苷中共有 23 种化合物, 包括 17 个三萜皂苷和 6 个酚类化合物<sup>[29]</sup>, 主要组成成分为齐墩果酸、常春藤红素和商陆果酸 3 种<sup>[30]</sup>。这些代谢物具有广泛的生物活性。三萜皂苷是藜麦苦涩味的主要呈味物质<sup>[31]</sup>, 对人体黏膜具有刺激作用, 因此在加工过程中常通过降低皂苷含量来减少其对加工品质的影响, 复合酶辅助提取和剥皮联合烘烤法是目前应用最为广泛的藜麦皂苷去除法。藜麦皂苷具有多种生理功能, 如藜麦麸皮中的皂苷具有良好的抗氧化能力, 可以降低丙氨酸转氨酶和天冬氨酸转氨酶的含量从而抑制肝脏内脂质沉积, 因此, 在保持口感的同时, 应尽量减少皂苷的损失。此外, 藜麦麸皮皂苷可以调节高尿酸血症小鼠的尿酸、尿素氮和肌酐异常, 未来可作为天然膳食补充剂作用于高尿酸血症的临床治疗中<sup>[32]</sup>。为拓展其在医药领域的应用, 隋心等<sup>[33]</sup>采用新型 Pickering 乳液递送系统包埋藜麦皂苷, 通过体外消化实验证明其在消化过程中释放百分比高且生物利用率较高。此外, 藜麦皂苷是一种生物表面活性剂, 可以代替十二烷基醚硫酸盐和十二烷基硫酸钠等表面活性剂<sup>[34]</sup>, 应用于化妆品行业。藜麦皂苷的提取方法和化学结构是目前的研究热点, 一般采用甲醇或乙醇提取, 通过正丁醇萃取以获得粗皂苷。

#### 1.4.3 甜菜素与植物甾醇

甜菜素是一种天然植物色素, 具有强大的抗氧化特性, 对人体健康有益。甜菜素由藜麦中的酪氨酸衍生而来, 分为甜菜黄素和甜菜红素<sup>[35]</sup>。FATIM 等<sup>[36]</sup>首次从有色藜麦种子中检测到甜菜素的含量为 0.15~6.10 g/100 g。甜菜素主要分布于深色藜麦地上植株部分, 而实际应用中秸秆和种皮等常作为副产物而废弃, 其深加工价值没有被合理开发。藜麦中甜菜素的含量同样受品种、籽粒颜色和种植环境等因素影响。藜麦甜菜素不仅在食品领域有广泛的前景, 其在医药领域的潜在价值也值得关注, 因此, 目前主要集中在甜菜素的提取和纯化工艺方面, 以期未来能更好地研究其稳定性和抗氧化活性。

植物甾醇是广泛存在于植物源性食品中的一种活性物质, 其不仅是生物膜系统的重要组成部分, 也是各类固醇激素的合成前体物质, 分别为马克甾酮 A、24-表马克甾

酮 A、24(28)-脱氢马基酮 A、20-羟基蜕皮甾酮和 20,26-羟基蜕皮甾酮<sup>[37]</sup>。根据碳骨架的不同,藜麦甾醇可以分为 C27-、C28-和 C29-。蜕皮甾醇是藜麦中主要的植物甾醇,存在于藜麦麸皮中,可使藜麦免受昆虫和线虫的侵害,其中 20-羟基蜕皮甾酮含量最多,主要存在于藜麦种子胚乳中<sup>[38]</sup>,其含量达到 960.0  $\mu\text{g/g}$ <sup>[39]</sup>。藜麦甾醇的提取工艺仍然是广大研究者的关注点,其中,超临界  $\text{CO}_2$ -皂化法是一种有效的提取技术。藜麦甾醇作为功能性食品和化妆品配方中的重要组成部分,具有极高的开发价值。随着对藜麦甾醇研究的深入,未来可能会进一步探索其在预防各种慢性疾病和促进人类健康方面的潜力。

## 2 藜麦的生理活性作用

### 2.1 抗氧化作用

藜麦因富含多酚、多糖及可溶性膳食纤维等物质,具有优越的抗氧化性能,在食品和医疗行业被作为一种天然抗氧化剂应用。酚类物质抗氧化的机制主要通过阻断自由基反应过程以及抑制或减少自由基的产生来实现<sup>[40]</sup>。藜麦的抗氧化活性与藜麦品种、生长环境以及提取部位密切相关。一般认为,深色藜麦中抗氧化活性高于浅色藜麦,且发芽和发酵藜麦的抗氧化活性也随酚类物质含量的增加而提高。有研究证实藜麦根和藜麦芽的抗氧化能力较高。此外,藜麦中的多糖、蛋白质和脂质等成分在消化过程中可能发生了结构变化,从而影响了其抗氧化活性。研究发现藜麦中可溶性膳食纤维表现出对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS]和羟基自由基的清除能力以及较强的铁还原能力,且与膳食纤维浓度呈正相关关系<sup>[41]</sup>,说明藜麦可溶性膳食纤维也具有体外抗氧化活性。BALAKRISHNAN 等<sup>[42]</sup>测定肠消化、胃消化和未消化处理的 3 种藜麦样品的抗氧化能力,结果显示肠消化藜麦产品具有最高的抗氧化活性,可能是肠消化阶段,藜麦中更多的生物活性成分被释放出来,从而表现出更强的自由基清除能力。除此之外,藜麦抗氧化能力与提取溶剂类型也有一定的关系,相比于有机溶剂,低共熔溶剂皂苷提取物均具有较好的抗氧化活性<sup>[43]</sup>,并与浓度呈线性关系。这些发现有助于理解食物消化过程中生物活性成分的变化,以及如何通过食品加工和烹饪方法来提高食品的营养价值和健康效益。

### 2.2 抗菌作用

近年来,随着抗生素的滥用,微生物耐药性已成为全球性问题,寻找来自于天然植物中具有良好抗菌活性的功能成分对于食源性疾病的防治至关重要。藜麦中富含多酚和皂苷,对食源性致病微生物具有良好的抗菌活性。藜麦皂苷碱提取物可以破坏细胞膜的完整性,降低细菌细胞膜

的膜电势以及生物被膜的活性,使细胞壁破裂,从而发挥抑菌作用<sup>[44]</sup>。DONG 等<sup>[45]</sup>采用纸片扩散法和最小抑制浓度/最小杀菌浓度(minimum inhibitory concentration/minimum bactericidal concentration, MIC/MBC)评估法评估了藜麦皂苷的抑菌效果,对金黄色葡萄球菌、表皮葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌的抗菌作用较为明显,且浓度与抗菌作用效果呈剂量-效应关系。藜麦的抗菌活性不仅局限于其皂苷成分,还包括多酚、黄酮等其他多种生物活性物质。藜麦多酚类物质还可以诱导大量活性氧的产生造成内源性氧化应激从而导致细胞死亡,黄酮提取物对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的抑菌圈直径分别为 12.4 mm 和 13.2 mm,为中度敏感<sup>[46]</sup>。这些成分对食源性致病菌的抑制作用有助于提高食品的安全性和延长食品的保质期。

### 2.3 降血糖与降血脂作用

藜麦作为一种营养丰富的杂粮,近年来在降血糖和降血脂方面的研究取得显著进展。藜麦在维持血糖水平、改善超重或肥胖、降低血脂、抗炎和抗肿瘤等方面的效果主要是基于其丰富的生理活性成分,如皂苷、多酚、黄酮等。首先,藜麦本身就是一种低果糖低葡萄糖的食物,可以有效调节人体内的血糖代谢。研究发现,藜麦黄酮、皂苷类化合物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用显著高于对照组,且抑制作用与浓度呈显著的剂量依赖性,具有显著的降血糖活性<sup>[29]</sup>。此外,藜麦游离酚提取物对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用高于结合酚提取物,抑制率与酚类物质含量也呈剂量依赖性。藜麦多肽中含有丰富的氨基酸,特有氨基酸可以阻止脂类物质与胆酸的相互作用,从而影响脂类的代谢,达到降低机体吸收血脂的功效。藜麦多肽还可以与胆酸盐结合来促进人体内胆固醇的分解代谢,达到降血脂的功效。因此,藜麦作为一种全营养食品,未来应加大其在功能性食品、保健品和药品方向的开发力度,并进一步通过动物试验和细胞试验探讨其作用机制。

### 2.4 抗炎作用

近年来,藜麦抗炎特性备受研究者关注。藜麦的抗炎活性通常是通过细胞实验或动物模型来评估的。研究人员通过构建结肠炎小鼠模型,证明摄入 1.5 g/kg BW 藜麦麸皮纤维素可以降低小鼠体内肿瘤坏死因子- $\alpha$  (tumor necrosis factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ )和白细胞介素-1 $\beta$  (interleukin-1 $\beta$ , IL-1 $\beta$ )的水平,降低单核细胞趋化蛋白-1 (monocyte chemotactic protein 1, MCP-1)在结肠中的表达,增加 IL-1 $\beta$  的表达,从而缓解结肠炎的炎症症状<sup>[47]</sup>。皂苷是藜麦中的主要抗炎成分之一。LI 等<sup>[48]</sup>通过动物实验证明 100 mg/(kg·BW)的藜麦总皂苷可以降低高脂肪饮食诱导的肥胖小鼠模型中的血清白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)、IL-1 $\beta$  和 TNF- $\alpha$  的水平。此外,藜麦总皂苷对肠道微生物群的调节作用可以改善代谢紊乱,从而发挥抗炎

作用。除此之外, 藜麦多糖可以作为益生元调节人体肠道微生物群, 影响人体肠道健康和免疫功能。CAO 等<sup>[49]</sup>通过构建高脂肪诱导的肥胖小鼠, 证明 300 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>和 600 mg·kg<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>的藜麦多糖可以改善小鼠的高脂血症, 同时调节肠道微生物群落结构, 降低肠道有害菌——脱硫弧菌属和异体杆菌的相对丰度, 有利于减轻肠道炎症。REN 等<sup>[50]</sup>首次从藜麦中检测到生物活性肽, 藜麦活性肽提取物可以抑制脂多糖刺激的小鼠单核巨噬细胞白血病细胞(RAW264.7)产生的 NO、TNF- $\alpha$  和 IL-6 的上调, 抑制程度呈现剂量依赖性, 当质量浓度为 0.40 g/L 时, 对 NO、TNF- $\alpha$  和 IL-6 的抑制率分别为 44.77%、39.81%、33.50%。综上所述, 藜麦的抗炎特性主要归功于其丰富的生物活性成分, 这些成分通过多种机制发挥抗炎作用, 为开发抗炎食品和药物提供了新的选择, 未来可加大藜麦作为功能性食品方面的研究。

## 2.5 抗癌作用

研究调查显示, 30%~50%的癌症是由于饮食不当所引起的, 因此通过膳食干预是目前癌症治疗的一个热点方向。全谷物中由于含有大量的功能活性成分, 有助于降低血液中某些炎性细胞因子的水平。研究发现, 藜麦的提取物可以抑制人体肝癌细胞(human hepatocellular carcinomas, HEPG2)的生长, 藜麦蛋白可以显著抑制结肠癌细胞(human colon cancer cell line, DLD-1)和人类结肠直肠癌细胞-8 (human colorectal carcinoma cells-8, HCT-8)的增殖和克隆形成能力, 诱导 HCT-8 细胞凋亡, 阻止结肠癌细胞的迁

移, 从而抑制结肠癌的发病率<sup>[51]</sup>。研究证明藜麦皂苷质量浓度为 160  $\mu\text{g/mL}$  时对结肠癌细胞的抑制效果最显著, 且呈剂量依赖性, 此外皂苷还从抑制细胞迁移和降低相关蛋白的表达两个方面来降低结肠癌的发病率<sup>[52]</sup>。藜麦中的新型生物活性多糖也能表现出对癌细胞的抑制作用。综上所述, 藜麦中的多种生物活性成分为其抗癌活性提供了科学依据, 未来的研究可能会进一步揭示其在癌症预防和治疗中的应用潜力。

## 2.6 其他功能

除上述功能活性作用之外, 藜麦还具有抗衰老、抗病毒等生理活性, 具体见表 2。藜麦蛋白提取物对烟草花叶病毒、巨细胞病毒和小西葫芦黄花叶病毒具有显著的抗病毒活性, 对病毒的抑制作用与藜麦蛋白的浓度呈剂量依赖性<sup>[53]</sup>。此外, 研究表明连续 3 周摄入 100 mg/g 藜麦非淀粉多糖可以恢复药物诱导的免疫抑制小鼠的免疫活性, 增加小鼠血清中的 IFN- $\gamma$ 、IL-6、IFN- $\alpha$ 、IgM 和溶菌酶的含量, 增强小鼠巨噬细胞的吞噬功能, 改善迟发性过敏反应<sup>[54]</sup>。HU 等<sup>[55]</sup>使用 D-半乳糖诱导小鼠衰老从而导致小鼠学习和认知能力下降, 通过喂养从藜麦中提取的多糖, 与对照组小鼠相比, 藜麦多糖可以显著改善模型小鼠的认知障碍, 减少脑组织和肝组织的氧化应激。乳糜泻是一种由于摄入麸质蛋白所引起的终身性疾病, 藜麦不含麸质蛋白, 因此可以通过膳食配餐供乳糜泻患者食用, 连续 6 周每日摄入 50 g 藜麦可以轻度降低乳糜泻患者的胆固醇水平, 改善受试人群的肠道组织学状态<sup>[56]</sup>。

表 2 藜麦相关生理活性作用  
Table 2 Relevant bioactive effects of *Chenopodium quinoa* Willd.

生理活性	植株部位	活性物质	受试物	效果	参考文献
抗病毒活性	种子、根、茎、叶	藜麦蛋白(quinoiin-1)	烟草花叶病毒 巨细胞病毒 小西葫芦黄花叶病毒	烟草花叶病毒: 88.07% 巨细胞病毒: 82.38% 小西葫芦黄花叶病毒: 57.14%	[53]
改善免疫抑制作用	种子	非淀粉可溶性多糖	环磷酸腺苷诱导的免疫抑制小鼠模型	IFN- $\gamma$ ↑, IL-6↑, IFN- $\alpha$ ↑, IgM↑ 溶菌酶↑	[54]
抗衰老活性	种子	多糖	D-半乳糖致衰老小鼠模型	逃逸潜伏期↓, 游泳距离↓, 氧化应激↓, 单胺氧化酶抑制剂水平↓, 乙酰胆碱酯酶活性↑	[55]
降尿酸活性	麸皮	皂苷	腺嘌呤和氧嗉酸钾联合诱导构建高尿酸小鼠模型	小鼠血清尿酸↓, 尿素氮↓, 肌酐水平↓, 肾小球扩张↓, 肾小管萎缩↓	[56]
预防肝纤维化	麸皮	芦丁	四氯化碳诱导的肝损伤小鼠模型	丙氨酸氨基转移酶活性↑, 天门冬氨酸氨基转移酶活性↑, 超氧化物歧化酶活性↓, 过氧化氢酶↓, 抑制 TNF- $\alpha$ /IL-6 通路并阻断 TGF- $\beta$ 通路	[57]

注: 干扰素- $\gamma$  (interferon- $\gamma$ , IFN- $\gamma$ ); 白细胞介素 (interleukin-6, IL-6); 干扰素- $\alpha$  (interferon- $\alpha$ , IFN- $\alpha$ ); 免疫球蛋白 M (immunoglobulin M, IgM); 转化生长因子- $\beta$  (transforming growth factor- $\beta$ , TGF- $\beta$ )。

### 3 藜麦加工和资源综合利用

#### 3.1 加工对藜麦营养和活性成分的影响

我国作为粮食生产和消费的大国,近年来,粮食生产和加工的综合能力不断增强,同时粮食消费结构发生了明显变化,消费者对于食物的营养化、功能化、健康化提出了更高的要求<sup>[58]</sup>。2022年中国粮食及主食行业规模达到1.94万亿元,大米占比38.8%,面粉占比22.9%、玉米占比10.3%,说明人们对于主食的需求逐渐向多样化趋势发展。藜麦自身的营养价值与人体活动消耗的营养物质基本匹配,可作为膳食补充剂加强人体营养物质的摄入。因此,市面上出现了多样化的藜麦产品,其烹饪方式丰富,涉及到蒸、煮、炸、炒等,烹饪过程中涉及到的参数也较为复杂,烹饪方式和烹饪因素对营养素和功能活性成分有不同的影响,尤其是在维生素的保留和损失方面,不同的烹饪方式差异较大。此外,不同的烹饪方式对藜麦制品的风味和功能影响也比较显著。如蒸煮处理可以产生更多的风味物质和较低的淀粉水解指数,是非常健康的烹饪方式。发芽被认为是增强藜麦食用和营养品质最有效的非热食品加工方法之一,藜麦发芽后种子内天然酶系统被激活,分解出蛋白质和淀粉等主要营养物质以及活性成分,且发芽不破坏种皮,有利于保护种皮中的膳食纤维和多酚类物质,因此,发芽藜麦具有优越的营养价值、加工品质和功能特性,未来应加强发芽藜麦的产品开发和功能评价。藜麦籽粉是一种适合细菌菌株发酵的材料,在发酵后和储存过程中具有高活菌数。微生物发酵可以增加藜麦的营养价值并减少其抗营养因子。因此,发酵藜麦可以成为开发功能性食品的

有前途的食品成分,以实现消费者的高可接受性和健康益处。藜麦中的皂苷会影响食用的口感,同时是一种抗营养因子,食用过量会引起中毒,因此在产品加工前通常需要进行皂苷脱除,但藜麦中营养物质分布部位不同,因此不同的脱除工艺对其含量影响也不同。研究利用物理碾磨脱除皂苷时,由于蛋白质、维生素和矿物质分布在藜麦籽粒的外皮,导致营养物质损失较高。采用发酵法和萌发处理脱除皂苷工艺中大量还原性单糖的生成,可以掩盖皂苷的苦味,从而改善藜麦的食用品质。因此,合理的去皮和脱除皂苷工艺研究,可以提高藜麦营养物质的保留率,减少藜麦资源的浪费。

#### 3.2 藜麦及其副产物综合利用研究进展

近年来,随着消费者生活质量的不断提高,追求食物营养素精细化和平衡化使得对藜麦的需求量大大增加,藜麦种植面积逐年上升,藜麦副产物的产品也随之增加。当前藜麦的研究重点在提高产量或开发其功能价值方面,对于藜麦副产物资源的综合利用研究较少。藜麦在加工过程中产生的副产物包括秕谷、麸皮、糠和秸秆,含有丰富的纤维素和其他活性成分,在畜牧、食品、工业和医药领域具有广泛的应用前景(见图1),因此可以从废物利用的角度出发,拓展藜麦全植株生产高附加值产品的创新用途。

在动物饲料利用方面,藜麦秕谷的蛋白质含量优于其他部位,具有优越的饲用价值<sup>[59]</sup>。此外,藜麦中的木质素含量低于玉米秸秆,当藜麦秸秆作为动物饲料时,可减少木质素对胃蛋白酶和胰蛋白酶的酶解抵抗作用,木质素也是秸秆自然降解过程中的限速因子。张爱文等<sup>[60]</sup>在藜麦副产物中测定出47中挥发性化合物,这些风味物质不仅

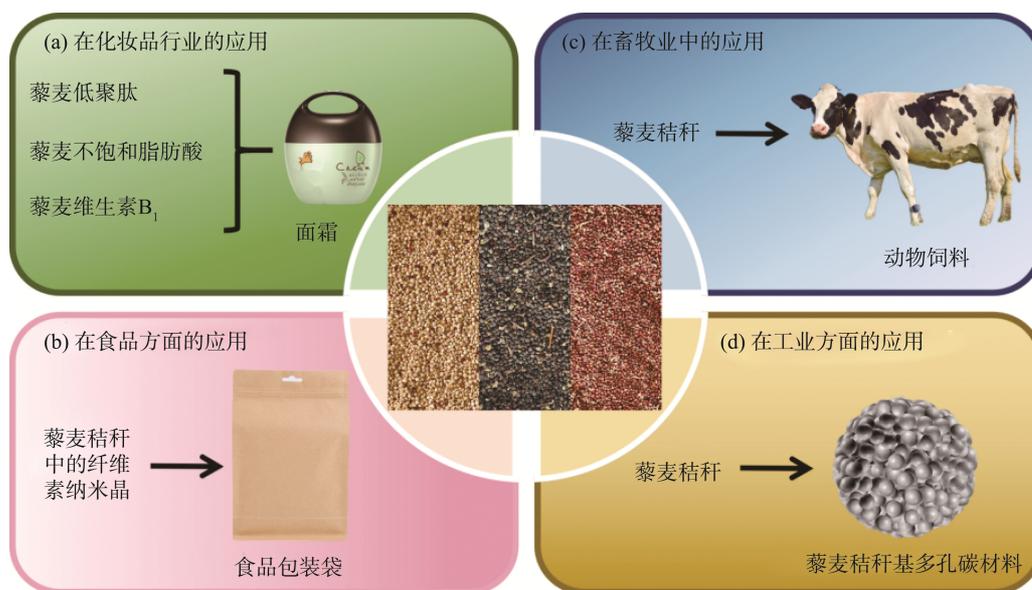


图1 藜麦及其副产物的综合利用

Fig.1 Comprehensive utilization of *Chenopodium quinoa* Willd. and its by-products

在藜麦贮藏过程中发挥抗氧化作用, 同时也可以提高藜麦的适口性, 促进其在动物饲料中的高效利用, 这为藜麦副产物在动物饲料中的高效利用提供了依据。在工业方面, 将藜麦秸秆中的纤维素纳米晶与高直链玉米淀粉混合后制备成纳米复合膜<sup>[61]</sup>, 可作为新型生物可降解包装材料, 有效改善包装材料的机械性能, 未来可以应用于食品保鲜中。王致霄<sup>[62]</sup>以藜麦秸秆为原料制备出藜麦秸秆基多孔碳材料, 是一种性能优异的吸附剂, 可用于废水的净化和处理。此外, 藜麦在生物能源制造和农业应用等方面均具有显著的作用, 未来, 加大藜麦副产物的综合利用有利于其高值化发展。

#### 4 结束语

随着人们消费观念的转变, 粗粮在主食中所占的比例逐步提高, 藜麦及其加工产品逐渐发展成为新赛道。藜麦是一种高蛋白质、高纤维、低糖、低脂肪的全谷物, 其蛋白质、氨基酸和矿物质等均高于普通的谷类, 次生代谢产物具有多种功能活性作用, 因此藜麦在国内的关注度和消费量日益提高。为了加快藜麦全植株综合利用与开发, 未来应从如下几个方向进行研究:

(1) 加大对藜麦中主要营养素和功能活性成分的研究和在食品药品、工业领域的应用。目前, 藜麦的研究多集中在品种培育和种植以及开发高营养价值的产品方面, 对于藜麦功能活性成分的作用机制研究较少, 如多肽的作用机制以及在其他行业的应用研究尚缺乏深入的临床试验。此外, 藜麦中营养素和功能活性物质丰富, 应从整体的角度出发, 优化藜麦生物活性物质的提取, 并深入研究其与人体内天然活性物质的交互作用, 最大程度地发挥藜麦的功能活性物质的功效。

(2) 加大对功能性杂粮食品和保健食品的开发。当前藜麦食品的热点方向聚焦在乳制品及植物代乳制品和发酵饮料。伴随着日新月异的食物科技技术, 未来藜麦还可以加工成藜麦代餐粉、藜麦酒、藜麦饼干、藜麦牛奶等多种食品, 随着市场需求的增加, 这些深加工产品的种类和数量将会进一步增加。藜麦拥有优良的医用价值、营养价值、农用价值和经济价值, 营养素全面且均衡, 因此应用于食药行业的优势尤为突出, 但由于其中含有的皂苷等抗营养因子会对风味和营养成分的生物利用率有一定影响, 但皂苷具有多种药理活性, 因此未来合理开发皂苷脱除技术以及考虑如何将其应用到其他行业显得尤为重要。

(3) 加大对藜麦副产物的综合利用以及生产高附加值产品。藜麦产量逐渐上升, 与此同时藜麦副产物得不到合理的利用, 大多当作废弃物处理, 以藜麦秸秆为例可作为良好的生物质应用于食品包装。此外全方位实现藜麦全植株的综合利用, 不仅可以优化人体食物营养摄入结构, 同时有助于推动我国杂粮产业的发展。

#### 参考文献

- [1] ZEYNEB H, PEI H, CAO X, *et al.* *In vitro* study of the effect of quinoa and quinoa polysaccharides on human gut microbiota [J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(10): 5735–5745.
- [2] PEREIRA E, ENCINA ZC, BARROS L *et al.* Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium quinoa* willd (quinoa) grains: A good alternative to nutritious food [J]. *Food Chem*, 2019, 280: 110–114.
- [3] 余远, 陶飞燕, 纪雪莹, 等. 藜麦表皮皂苷的抗氧化活性及基于代谢组学探究其改善非酒精性脂肪肝的作用机制[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(12): 70–77.  
YU Y, TAO FY, JI XY, *et al.* Antioxidant activity of quinoa husks saponins and metabolomics-based investigation of their mechanisms of alleviating non-alcoholic fatty liver disease [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2023, 39(12): 70–77.
- [4] 钟婉滢, 苗建银, 叶灏铎, 等. 藜麦蛋白酶的酶解制备及体外降血脂与降尿酸活性研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(23): 156–166.  
ZHONG WY, MIAO JY, YE HD, *et al.* Enzymatic preparation of quinoa protein peptides and its lipid-lowering and uric acid lowering activity *in vitro* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44(23): 156–166.
- [5] GONZALEZ MA, VALLE M, ALUKO R, *et al.* Production of antihypertensive and antidiabetic peptide fractions from quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) by electro dialysis with ultrafiltration membranes [J]. *Food Sci Human Well*, 2022, 11(6): 1650–1659.
- [6] 杜乾, 栗慧, 孙丰梅. 藜麦产品加工利用研究进展[J]. *食品工程*, 2023, 1: 14–16, 40.  
DU Q, LI H, SUN FM. Research progress in processing and utilization of quinoa production [J]. *Food Eng*, 2023, 1: 14–16, 40.
- [7] 王龙飞, 王新伟, 赵仁勇. 藜麦蛋白的特点、性质及提取的研究进展[J]. *食品工业*, 2017, 38(7): 255–258.  
WANG LF, WANG XW, ZHAO RY. A review of characteristic, properties and extraction of quinoa protein [J]. *Food Ind*, 2017, 38(7): 255–258.
- [8] 袁晓丽. 藜麦淀粉的提取及改性后理化性质的分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.  
YUAN XL. Extraction of quinoa starch and analysis of physicochemical properties after modification [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [9] 陈茜, 王振兴, 孙健, 等. 藜麦的营养成分、生物活性及加工利用[J]. *生物加工过程*, 2023, 21(3): 292–300.  
CHEN Q, WANG ZX, SUN J, *et al.* Research progress on nutritional components, functional activities, and processing and utilization of quinoa [J]. *Chin J Bioproc Eng*, 2023, 21(3): 292–300.
- [10] WU G, MORRIS CF, MURPHY KM. Quinoa starch characteristics and their correlations with the texture profile analysis (TPA) of cooked quinoa [J]. *J Food Sci*, 2017, 82(10): 2387–2395.
- [11] WU G, ROSS CF, MORRIS CF, *et al.* Lexicon development, consumer acceptance, and drivers of liking of quinoa varieties [J]. *J Food Sci*, 2017, 82(4): 993–1005.
- [12] 陈冬铃. 酶解球磨协同处理对藜麦淀粉乳化性能的改善作用及机理[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.  
CHEN DL. The improving effect and mechanism of enzymatic hydrolysis and ball mill synergistic treatment on the emulsification performance of quinoa starch [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
- [13] 潘自强, 张琦, 潘鑫, 等. 响应面法优化碱法提取藜麦淀粉及其性质研究[J]. *中国调味品*, 2023, 48(5): 57–64  
PAN ZQ, ZHANG Q, PAN X, *et al.* Optimization of alkaline extraction

- of quinoa starch by response surface methodology and study on its properties [J]. *Chin Cond*, 2023, 48(5): 57–64.
- [14] GÓMEZ MJR, PRIETO JM, SOBRADO VC, *et al.* Nutritional characterization of six quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties cultivated in Southern Europe [J]. *J Food Compos Anal*, 2021, 99: 103876.
- [15] ABUGOCH LE, NALDA R, TAPIA CA, *et al.* Study of some physicochemical and functional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein isolates [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(12): 4745–4750.
- [16] DINI I, TENORE GD, DINI A. Nutritional and antinutritional composition of Kancolla seeds: An interesting and underexploited andine food plant [J]. *Food Chem*, 2005, 92: 125–132.
- [17] CAO H, SUN R, SHI J, *et al.* Effect of ultrasonic on the structure and quality characteristics of quinoa protein oxidation aggregates [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 77: 105685.
- [18] WRIGHT KH, PIKE OA, FAIRBANKS DJ, *et al.* Composition of *Atriplex hortensis*, sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds [J]. *J Food Sci*, 2002, 67(4): 1383–1385.
- [19] 徐铭悦, 刘清浩, 谢龙, 等. 超声辅助提取对藜麦麸皮蛋白结构及功能特性的影响[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(4): 427–436.
- XU MY, LIU QH, XIE L, *et al.* Effect of ultrasound-assisted extraction on the structure and functional properties of quinoa bran protein [J]. *J North Univ Chin (Nat Sci Ed)*, 2023, 44(4): 427–436.
- [20] 王黎明, 马宁, 李颂, 等. 藜麦的营养价值及其应用前景[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(1): 381–384.
- WANG LM, MA N, LI S, *et al.* Nutritional properties of quinoa and its application prospects [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(1): 381–384.
- [21] REPO CR, ESPINOZAC, JACOBSEN SE. Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) [J]. *Food Rev Int*, 2003, 19(1-2): 179–189.
- [22] ABUGOCH LE. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, chemistry, nutritional and functional properties of quinoa [J]. *Adv Food Nutr Res*, 2009, 58: 1–31.
- [23] 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 Chem*, 2015, 166: 380–388.
- [24] REPO CV, HELLSTROM JK, PIHLAVA JM, *et al.* Flavonoids and other phenolic compounds in andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*) [J]. *Food Chem*, 2010, 120(1): 128–133.
- [25] 石钰, 张龙龙. 白藜麦总黄酮提取纯化工艺及化学成分分离[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(8): 94–101.
- SHI Y, ZHANG LL. Extraction, purification technology of total flavonoids from white *Chenopodium quinoa* and separation of chemical components [J]. *Chin Food Addit*, 2023, 34(8): 94–101.
- [26] 周学永, 牛艳, 杨利艳, 等. 藜麦糠皮皂苷提取技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(2): 258–265.
- ZHOU XY, NIU Y, YANG LY, *et al.* Research progress in extraction of saponins from quinoa bran [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(2): 258–265.
- [27] 赵亚东. 青海藜麦资源营养品质评价及功能成分与抗氧化活性研究[D]. 西宁: 青海大学, 2018.
- ZHAO YD. Nutritional quality evaluation and study of the functional compositions and antioxidant activities in quinoa from Qinghai [D]. Xining: Qinghai University, 2018.
- [28] GUCLU-USTUNDAG O, and MAZZA G. Saponins: Properties, applications and processing [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2007, 47: 231–258.
- [29] 苏蓉. 藜麦皮中 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制剂的筛选及其作用机制研究[D]. 西宁: 青海大学, 2023.
- SU R. Screening for  $\alpha$ -glucosidase inhibitors and research on effect mechanism of quinoa husks [D]. Xining: Qinghai University, 2023.
- [30] LIM JG, PARK HM, YOON KS. Analysis of saponin composition and comparison of the antioxidant activity of various parts of the quinoa plant (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. *Food Sci Nutr*, 2019, 8(1): 694–702.
- [31] 熊成文, 李晓伟, 徐得娟. 藜麦总皂苷含量测定方法的比较[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(9): 124–128.
- XIONG CW, LI XW, XU DJ. Comparison of different methods for the determination of total saponins in quinoa [J]. *Food Res Dev*, 2018, 39(9): 124–128.
- [32] 林莹. 藜麦麸皮皂苷对高尿酸血症的干预作用及其机制探究[D]. 保定: 河北农业大学, 2023.
- LIN X. Intervention of quinoa bran saponins on hyperuricemia and its mechanism [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023.
- [33] 隋心, 宋士新, 陶立, 等. 负载藜麦皂苷 Pickering 乳液的制备、性质表征和体外消化特性[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(2): 79–87.
- SUI X, SONG SX, TAO L, *et al.* Preparation, characterization and *in vitro* digestion properties of Pickering emulsion loaded with quinoa saponin [J]. *China Food Addit*, 2024, 35(2): 79–87.
- [34] 何海芬, 朱统臣, 林飞武. 藜麦在化妆品中的应用前景[J]. *广东化工*, 2018, 45(2): 120–122, 134.
- HE HF, ZHU TC, LIN FW. Application prospect of quinoa in cosmetics [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2018, 45: 120–122, 134.
- [35] IMAMURA T, TAKAGI H, MIYAZATOI A, *et al.* Isolation and characterization of the betalain biosynthesis gene involved in hypocotyl pigmentation of the allotetraploid *Chenopodium quinoa* [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2018, 496(2): 280–286.
- [36] FATIMA A, ELLIZABETH H, ROGER S, *et al.* Physical features, phenolic compounds, betalains and total antioxidant capacity of coloured quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) from peruvian altiplano [J]. *Food Chem*, 2015, 183: 83–90.
- [37] WANG HW, TAN JN, SHANG XC, *et al.* Porous organic cage incorporated monoliths for solid-phase extraction coupled with liquid chromatography-mass spectrometry for identification of ecdysteroids from *Chenopodium quinoa* Willd. [J]. *J Chromatogr A*, 2019, 1583: 55–62.
- [38] ZHU N, KIKUZAKI H, VASTANO BC, *et al.* Ecdysteroids of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(5): 2576–2578.
- [39] KUMPUN S, ANNICK M, SOPHIE C, *et al.* Ecdysteroids from *Chenopodium quinoa* Willd, an ancient andean crop of high nutritional value [J]. *Food Chem*, 2011, 125(4): 1226–1234.
- [40] 李晓芬. 植物多酚清除 DPPH 自由基活性的新方法研究及应用[D]. 昆明: 云南民族大学, 2015.
- LI XF. New evaluation methods for the scavenging effect of plant polyphenols on DPPH free radical and their application [D]. Kunming: Yunnan Minzu University, 2015.
- [41] 王天, 江含秀, 路丽妮, 等. 藜麦可溶性膳食纤维提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(2): 137–146.
- WANG T, JIANG HX, LU LN, *et al.* Optimization of extraction process of quinoa soluble dietary fiber and its antioxidant activity [J]. *China Food Addit*, 2022, 33(2): 137–146.

- [42] BALAKRISHNAN G, RENEE GS. Quinoa flavonoids and their bioaccessibility during *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. *J Cere Sci*, 2020, 95: 103070.
- [43] CAI YQ, CAO H, SONG LM, *et al.* Optimization of green deep eutectic solvent (DES) extraction of *Chenopodium quinoa* Willd. Husks saponins by response surface methodology and their antioxidant activities [J]. *RSC Adv*, 2023, 13(42): 29408–29418.
- [44] 孙晓燕. 藜麦皂苷对口腔致病菌的抑制作用及其机理研究[D]. 烟台: 齐鲁工业大学, 2018.  
SUN XY. The inhibitory effect and mechanism of quinoa saponins on oral pathogens [D]. Yantai: Qilu University of Technology, 2018.
- [45] DONG SX, YANG XS, ZHAO L, *et al.* Antibacterial activity and mechanism of action saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. Husks against foodborne pathogenic bacteria [J]. *Ind Crops Prod*, 2020, 149: 112350.
- [46] 周媚, 万燕, 齐安银, 等. 响应面优化藜麦总黄酮超声辅助提取工艺及其抑菌活性研究[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(5): 62–66.  
ZHOU M, WAN Y, QI ANY, *et al.* Study on the optimization of ultrasonic-assisted extraction process of total flavonoids from quinoa by response surface methodology and its antibacterial activity [J]. *Cere Oils*, 2023, 36(5): 62–66.
- [47] LIU J, WANG ZW, MAI PS, *et al.* Quinoa bran soluble dietary fiber ameliorates dextran sodium sulfate induced ulcerative colitis in BALB/c mice by maintaining intestinal barrier function and modulating gut microbiota [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 216: 75–85.
- [48] LI W, SONG Y, CAO N, *et al.* Total saponins from quinoa bran alleviate high-fat diet-induced obesity and systemic inflammation via regulation of gut microbiota in rats [J]. *Food Sci Nutr*, 2022, 10(11): 3876–3889.
- [49] CAO YN, ZOU L, LI W, *et al.* Dietary quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) polysaccharides ameliorate high-fat diet-induced hyperlipidemia and modulate gut microbiota[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 163: 55–65.
- [50] REN G, ZHU Y, SHI Z, *et al.* Detection of lunasin in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and the *in vitro* evaluation of its antioxidant and anti-inflammatory activities [J]. *J Sci Food Agric*, 2017, 97(12): 4110–4116.
- [51] 加英, 张雪琛, 史江颖, 等. 藜麦活性蛋白的制备及抗结肠癌效应评价[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(11): 57–64.  
JIA Y, ZHANG XC, SHI JY, *et al.* Preparation of quinoa active protein and effect evaluation of its anti-colon cancer [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2022, 22(11): 57–64.
- [52] 商海军. 藜麦皂苷的提取分离及其抗结肠癌作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.  
SHANG HJ. Study on extraction and isolation of saponins from *Chenopodium quinoa* and its anti-colon cancer effect [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [53] BINIAZ Y, MOHAMMADREZA K, ALI N. *et al.* Purification of an antiviral protein from the seeds of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and characterization of its antiviral properties [J]. *Amino Acids*, 2023, 55(1): 19–31.
- [54] FAN S, LI J, BAI B. Purification, structural elucidation and *in vivo* immunity-enhancing activity of polysaccharides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2019, 83(12): 2334–2344.
- [55] HU Y, ZHOU J, CAO Y, *et al.* Anti-aging effects of polysaccharides from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in improving memory and cognitive function [J]. *J Funct Food*, 2022, 94: 105097.
- [56] ZEVALLOS VF, HERNCIA IL, CHANG F, *et al.* Gastrointestinal effects of eating quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in celiac patients [J]. *Off J Am Coll Gastroenterol*, 2014, 109(2): 270.
- [57] LIN TA, KE BJ, CHENG CS, *et al.* Red quinoa bran extracts protects against carbon tetrachloride-induced liver injury and fibrosis in mice via activation of antioxidative enzyme systems and blocking TGF- $\beta$ 1 pathway [J]. *Nutrients*, 2019, 11: 395.
- [58] 樊胜根, 田旭, 龙文进. 大食物观下我国食物供求均衡的挑战与对策[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2024(2): 1–9.  
FAN SG, TIAN X, LONG WJ. Challenges and countermeasures of food supply-demand balance in china under the greater food approach [J]. *J Huazhong Agric Univ (Soc Sci Ed)*, 2024(2): 1–9.
- [59] 江小帆, 杨发荣, 魏玉明, 等. 藜麦副产物常规养分与抗营养因子的检测及饲用价值评价[J]. *草业科学*, 2023, 40(3): 806–814.  
JIANG XF, YANG FR, WEI YM, *et al.* Detection of conventional nutrients and anti-nutritional factors in quinoa byproducts, and evaluation of their feeding value [J]. *Pratac Sci*, 2023, 40(3): 806–814.
- [60] 张爱文, 江小帆, 吴涛, 等. 藜麦副产物挥发性物质检测与关键风味物质评价[J]. *饲料研究*, 2022, 45(17): 115–119.  
ZHANG AIW, JIANG XF, WU T, *et al.* Detection of volatile substances and evaluation of key flavor substances in quinoa byproducts [J]. *Feed Res*, 2022, 45(17): 115–119.
- [61] 徐志航. 藜麦秸秆纳米纤维素对玉米淀粉膜性能影响及其在兰州百合保鲜中的应用[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.  
XU ZH. Effect of quinoa straw nanocellulose on the performance of corn starch film and its application in the preservation of Lanzhou lily [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024.
- [62] 王致霄. 藜麦秸秆基多孔碳材料的制备及其对罗丹明 B 的吸附性能研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.  
WANG ZX. Preparation of the porous carbon material based on quinoa straw and its adsorption performance for RhB [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)

## 作者简介



郭子渊, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与加工。

E-mail: guoziyuan0103@163.com



邓晓青, 讲师, 主要研究方向为食品营养与加工。

E-mail: dengxiaqing0@163.com