

藜麦多糖及糖醛酸单元抗氧化与降糖活性研究

罗浩然^{1,2*}, 石兴宇^{1*}, 徐京菁^{1,2}, 袁欣铭^{1,2}, 田璐^{1#}

¹北京农业职业学院食品与生物工程学院, 北京

²北京农学院生物与资源环境学院, 北京

收稿日期: 2025年2月26日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月8日

摘要

[目的]本研究旨在探究藜麦多糖及其组成单糖的体外抗氧化与降糖活性, 为藜麦多糖的功能性开发提供科学依据。[方法]通过DPPH自由基和羟自由基清除实验评估藜麦多糖的抗氧化活性, 利用 α -淀粉酶抑制实验评价其降糖活性。随后, 对葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸等单糖进行量效关系验证。[结果]藜麦多糖在4 mg·mL⁻¹时, DPPH自由基清除率为13.26%, 羟自由基清除率为12.71%, 且在16 mg·mL⁻¹时 α -淀粉酶抑制率高达87.44%。单糖中, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸表现出显著的抗氧化和降糖能力。在2 mg·mL⁻¹时, 半乳糖醛酸的羟自由基清除率高达98.32%, α -淀粉酶抑制率为55.14%; 葡萄糖醛酸的DPPH自由基清除率为10.27%, α -淀粉酶抑制率为48.24%。量效关系实验表明, 两种单糖的活性随浓度增加而显著增强。[结论]藜麦多糖及其组成单糖在体外具有显著的抗氧化及降糖作用, 尤其是葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸表现出极高的生物活性。

关键词

藜麦多糖, 糖醛酸, 抗氧化, 降糖

Study on the Antioxidant and Hypoglycemic Activities of Quinoa Polysaccharide and Its Uronic Acid Units

Haoran Luo^{1,2*}, Xingyu Shi^{1*}, Jingjing Xu^{1,2}, Xinming Yuan^{1,2}, Lu Tian^{1#}

¹College of Food and Biological Engineering, Beijing Vocational College of Agriculture, Beijing

*共同第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 罗浩然, 石兴宇, 徐京菁, 袁欣铭, 田璐. 藜麦多糖及糖醛酸单元抗氧化与降糖活性研究[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(3): 255-264. DOI: 10.12677/hjfn.2025.143029

Abstract

[Objective] This study investigates the *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activities of quinoa polysaccharides and their constituent monosaccharides, aiming to provide a scientific foundation for the functional development of quinoa polysaccharides. [Methods] The antioxidant activity of quinoa polysaccharides was evaluated using DPPH radical and hydroxyl radical scavenging assays. Hypoglycemic activity was assessed via α -amylase inhibition assays. Additionally, the dose-effect relationships of monosaccharides, including glucuronic acid and galacturonic acid, were examined. [Results] At a concentration of 4 mg·mL⁻¹, quinoa polysaccharides demonstrated a DPPH radical scavenging rate of 13.26% and a hydroxyl radical scavenging rate of 12.71%. At 16 mg·mL⁻¹, the α -amylase inhibition rate reached 87.44%. Among the monosaccharides, glucuronic acid and galacturonic acid exhibited remarkable antioxidant and hypoglycemic activities. Specifically, at 2 mg·mL⁻¹, galacturonic acid achieved a hydroxyl radical scavenging rate of 98.32% and an α -amylase inhibition rate of 55.14%. Glucuronic acid showed a DPPH radical scavenging rate of 10.27% and an α -amylase inhibition rate of 48.24%. Dose-effect experiments revealed that the activities of these two monosaccharides increased significantly with concentration. [Conclusion] Quinoa polysaccharides and their constituent monosaccharides, particularly glucuronic acid and galacturonic acid, exhibit significant antioxidant and hypoglycemic effects *in vitro*. These findings highlight the potential of quinoa polysaccharides and their monosaccharides as functional ingredients for applications in health and nutrition.

Keywords

Quinoa Polysaccharide, Uronic Acid, Antioxidant, Hypoglycemic

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今社会,随着人们生活节奏的加快和工作压力的增大,健康饮食逐渐成为人们关注的焦点。特别是针对具有抗氧化和降糖功能的食品,市场需求日益旺盛。这不仅体现了现代人对健康生活方式的追求,也反映了他们在应对生活压力时,对健康食品和功能性食品的迫切需求。

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.), 亦称藜谷、南美藜或昆诺阿藜,作为一种隶属苋科藜亚科藜属的一年生双子叶植物,其原产地主要位于南美洲安第斯山脉的秘鲁、玻利维亚及厄瓜多尔,拥有悠久的栽培历史[1]。藜麦因富含多糖、蛋白质、脂肪、矿物质及维生素等多元营养成分,被联合国粮农组织(FAO)誉为“唯一全营养单体谷物”,被视为能够全面满足人体基本营养需求的理想食品[2]。山西静乐地区凭借其优越的自然条件,成为我国种植藜麦较早、面积较大、品质较优、模式较成功的种植基地,因而被誉为“中国藜麦之乡”[3]。

多糖,作为一类由至少 10 个单糖单元通过糖苷键紧密连接而成的复杂高分子碳水化合物,在自然界

中广泛存在于植物体及微生物细胞壁中[4]。多糖展现了丰富的生物活性与多样的健康效应,包括但不限于抗肿瘤、抗氧化、抗病毒、调节血糖及血脂水平,以及增强机体免疫功能[5]。尤其在抗氧化领域,多糖因其卓越的清除自由基能力而备受关注,它能够显著降低血浆中的丙二醛水平,这一指标通常与氧化应激程度正相关[6],同时提升体内抗氧化酶的活性,如超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT),从而有效抵御氧化损伤[7]。

此外,多糖还通过多种途径发挥降血糖功能,包括调节肠道菌群结构、促进有益菌增殖、抑制有害菌生长、抑制胰岛素细胞凋亡、刺激胰岛素分泌、增强葡萄糖摄取和利用、促进肝糖原合成等机制[8]-[10],这些作用共同构成了多糖在调节糖代谢过程中的重要地位。研究表明,藜麦多糖可以有效抑制 α -淀粉酶活性,进而调控血糖水平[11]。鉴于植物多糖在体内通常需经过肠道微生物的复杂分解过程,转化为单糖后才能被人体或肠道菌群进一步吸收利用[12],因此,深入探究藜麦多糖中构成其基础的单糖单元的独立生物活性,不仅是对藜麦多糖功能研究的必要延伸,也为未来产品开发提供了科学依据。

然而,尽管藜麦多糖的生物活性已得到广泛认可,但关于其组成单糖的功能性研究却相对较少。这一研究空白限制了我们对于藜麦多糖健康机制的全面理解,也阻碍了其在功能性食品开发中的深入应用。因此,本研究在前人对藜麦多糖探索的基础上,进一步分离提取藜麦多糖,验证其体外抗氧化与降糖活性,并针对其组成中各标准单糖进行生物活性对比,旨在探究单糖是否可以独立产生抗氧化和 α -淀粉酶抑制作用。这一研究不仅有助于深化对多糖活性机理的认识,也为藜麦多糖及单糖产品的开发提供了理论基础和科学依据。

2. 材料和方法

2.1. 试验材料

山西静乐白藜麦,山西亿隆藜麦开发股份有限公司。葡萄糖(AR级),西陇科学股份有限公司。L-阿拉伯糖(HPLC级),上海千盛生物科技有限公司。D-葡萄糖醛酸(AR级),上海源叶生物科技有限公司。D-半乳糖醛酸(AR级),3%双氧水,天津市众联化学试剂有限公司。DPPH•(2,2-联苯基-1-苦基肼基,AR级),国药集团化学试剂北京有限公司。 α -淀粉酶(BR级),北京索莱宝科技有限公司。

2.2. 主要仪器与设备

DNM-9602 酶标分析仪,北京普朗新技术有限公司。UV-1800PC-DS2 紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司。RE-5203 旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂。SHB-III 循环水式多用真空泵,上海振捷实验设备有限公司。

2.3. 试验方法

2.3.1. 藜麦多糖的提取

参考前人方法[13],对藜麦进行预处理:挑选出饱满的籽粒,粉碎通过 40 目筛网筛选,确保粒度均匀。之后,在 70℃ 条件下烘干处理。接下来,按照 1:10 (m:v) 的料液比,加入 95% 乙醇溶液,静置 10 小时进行初步提取。提取后,再次于 60℃ 烘干备用。

按照 1:30 的料液比(m:v)加水配制成溶液,并使用氢氧化钠溶液调整 pH 值至 8.0。加入原料质量 3% 的胰蛋白酶,在 37℃ 恒温条件下提取 1 小时。为了灭活胰蛋白酶,将溶液煮沸 10 分钟。利用超声波辅助提取法,在 540 W 功率、63℃ 温度下处理 20 分钟,以增强多糖的释放。

提取液经过 4000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 15 分钟,获取上清液。通过旋转蒸发对上清液进行浓缩,再向浓缩液

中加入 3 倍体积的 95%乙醇, 于 4℃静置过夜以促进多糖沉淀。次日, 再次以 4000 r·min⁻¹ 离心 15 分钟, 收集沉淀物。最后, 将沉淀物溶解并定容至 250 mL, 得到藜麦多糖提取液。

2.3.2. 藜麦提取液活性成分含量测定

多糖含量测定: 参考前人方法[14], 首先精确配制浓度为 100 μg·mL⁻¹ 的葡萄糖标准溶液, 储存于冰箱中备用。取 0 (空白对照)、0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 mL 此溶液分别注入 50 mL 比色管, 加水调整至总体积为 2 mL。随后, 向每管中加入 1 mL 9%苯酚溶液并混匀, 紧接着快速滴加 5 mL 浓硫酸, 再次混匀。将比色管置于沸水浴中加热 30 分钟, 随后冰浴冷却 5 分钟。利用紫外-可见分光光度计, 在 490 nm 波长下测定各样品的吸光度, 据此绘制标准曲线, 其方程为 $y = 0.0131x - 0.007$, 相关系数 $R^2 = 0.9983$, 表明线性关系良好。

测定时, 先将 1 mL 样品提取液稀释至 100 mL, 再从中取 0.4 mL 稀释液, 加水至总体积为 2 mL, 按照上述步骤测定其吸光度值。将测得的吸光度值代入标准曲线方程, 计算出样品提取液中的多糖浓度。同时, 根据多次测定结果计算相对标准偏差(RSD), 以评估数据的重现性和可靠性。

2.3.3. 藜麦多糖提取液抗氧化活性评价

配制好浓度为 4 mg·mL⁻¹ 的 Vc 标准液, 并将其存放于棕色瓶中以避免光照影响。随后, 从该标准液中取出适量, 通过 2 倍梯度的方法进行倍比稀释, 即从 4 mg·mL⁻¹ 的浓度开始, 逐步稀释, 共选取六个不同的浓度梯度。配制好的标准溶液置于 4℃的冰箱中保存。

样品溶液的配制, 首先将提取液调整至 4 mg·mL⁻¹ 的浓度。与标准溶液的稀释方法相同, 也采用 2 倍梯度的倍比稀释方式, 连续进行稀释操作, 直至达到六个不同的浓度梯度。完成稀释后, 同样将这些样品溶液放置于 4℃的冰箱内保存, 以便后续实验使用。

DPPH·自由基清除试验: 依据前人的方法略有改动[15], 精确称量 80 mg DPPH·, 随后使用无水乙醇作为溶剂, 将其定容至 500 mL。将配制好的 DPPH·溶液转移至棕色瓶中, 置于冰箱中保存。

在测定过程中, 针对每个样品的不同梯度溶液, 分别取 2 mL, 并加入同样体积的 DPPH·溶液(即 2 mL), 充分混合均匀后, 将混合液放置于暗处静置 30 min。随后, 使用分光光度计在 517 nm 的波长下测定其吸光度值, 记为 D_1 。作为对比, 还需测定仅由 2 mL DPPH·溶液与 2 mL 蒸馏水混合后, 在相同条件下暗处静置 30 min 的吸光度值, 记为 D_0 。此外, 为了校正样品本身的吸光度, 还需测定 2 mL 样品梯度溶液与 2 mL 蒸馏水混合后的吸光度值, 记为 D_2 。所有测定过程中, 均使用超纯水进行调零, 并确保每个实验条件均进行三次重复操作。其中, 维生素 C(Vc)作为阳性对照, 其测定方法与样品溶液的测定方法完全一致。DPPH·清除率计算公式如下:

$$\text{清除率} = \frac{1 - (D_1 - D_2)}{D_0} \times 100\% \quad (1)$$

羟自由基清除试验: 依据前人的方法略有改动[16]。配制 7.5 mmol·L⁻¹ 双氧水溶液、7.5 mmol·L⁻¹ FeSO₄ 水溶液、8.0 mmol·L⁻¹ 水杨酸-乙醇溶液, 均棕色瓶 4℃冰箱保存。

在测定时, 每个样品梯度溶液 1 mL, 加入 1.5 mL FeSO₄ 溶液, 3 mL 水杨酸-乙醇溶液和 3 mL 3% 双氧水溶液, 混匀后在 37℃水浴下反应 45 min, Vc 为阳性对照, 试验方法与样品溶液一致, 均超纯水调零, 做 3 组重复, 测定 510 nm 处的吸光度值 A_1 , 水代替样品溶液反应后吸光度为 A_0 , 样品梯度溶液与 7.5 mL 水混合后的吸光度为对照组 A_2 , 羟自由基清除率计算公式如下:

$$\text{清除率} = \frac{A_0 - A_1 + A_2}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

2.3.4. 藜麦多糖提取液体外降糖活性评价

采用前人的方法略有改动[17], 根据碘-淀粉比色法测定提取液对 α -淀粉酶的抑制活性。在 2 mL 离心管中各加入不同梯度样品提取液 100 μ L, 再加入 800 μ L 0.5 g $\cdot$ L⁻¹ 淀粉溶液, 于 37℃ 温浴 5 min 后加入 100 μ L 0.05 mg $\cdot$ mL⁻¹ α -淀粉酶(溶剂为 0.1 mol $\cdot$ L⁻¹ pH 为 7.0 的磷酸钾缓冲液), 45℃ 反应 3 min 后, 加入 800 μ L 0.01 mol $\cdot$ L⁻¹ 碘液进行检测, 酶标仪在 660 nm 处测定吸光值为 A_i ; 酶以缓冲液代替, 其余与反应管一致, 反应后的吸光值记为 A_0 , 为 Control 组; 样品用水代替, 其余与反应管一致, 吸光度记为 A_H , 为空白组。采用下式计算 α -淀粉酶活性抑制率:

$$\text{抑制率} = \frac{A_i - A_H}{A_0 - A_H} \times 100\% \quad (3)$$

2.3.5. 藜麦单糖抗氧化及体外降糖活性评价

配制各单糖标准品溶液: 葡萄糖(Glc)、阿拉伯糖(Ara)、半乳糖(Gal)、甘露糖(Man)、鼠李糖(Rha)、木糖(Xyl)、葡萄糖醛酸(GlcA)和半乳糖醛酸(GalA)浓度均为 2 mg $\cdot$ mL⁻¹, 进行以下试验($n = 3$):

(1) 单糖 DPPH $\cdot$ 自由基和羟自由基清除试验

以 2.3.3 的方法进行试验, 样品为各单糖标准品溶液, Vc 为阳性对照。

(2) 单糖体外 α -淀粉酶活性抑制试验

以 2.3.4 的方法进行试验, 样品为各单糖标准品溶液。

2.3.6. 单糖量效关系验证试验

配制不同浓度的阿拉伯糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸样品溶液, 以上述方法进行试验, 检验其抗氧化、降糖效果与浓度之间的关系。

2.4. 统计分析

采用 GraphPad Prism 10.2.3 进行数据处理和绘图; 采用方差分析多重比较(ANOVA Multiple Comparisons)进行各试验组之间的显著性检验, 字母表示显著性差异, Duncan's multiple range test ($P < 0.05$, $n = 3$)。

3. 结果与分析

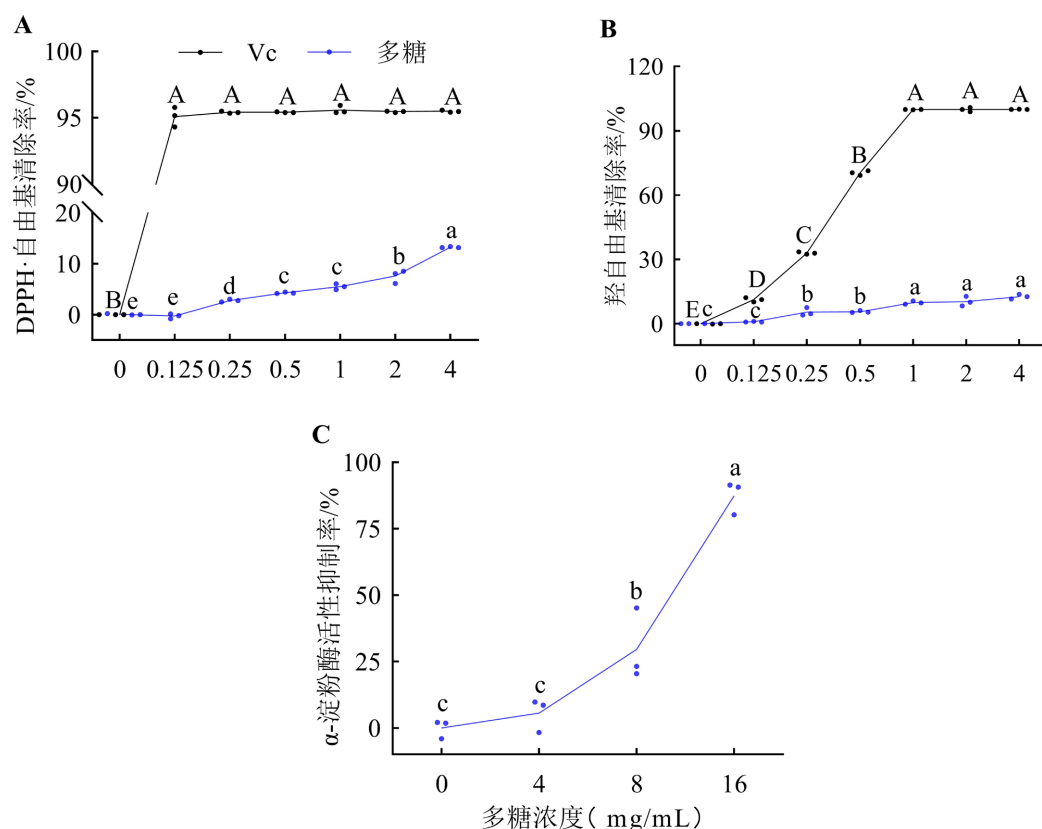
3.1. 藜麦多糖体外抗氧化、降糖功能验证

本研究首先验证了前人关于藜麦多糖的体外抗氧化及降糖能力的论述, 旨在为后续实验体系的可靠性奠定基础。

通过 DPPH $\cdot$ 自由基及羟自由基清除实验, 评估了藜麦多糖的抗氧化性能。结果如图 1(A)、图 1(B)所示, 与空白对照(0 mg $\cdot$ mL⁻¹)相比, 藜麦多糖在各浓度下均显著($P < 0.05$)提升了这两种自由基的清除能力, 且效果随浓度递增而增强。在 4 mg $\cdot$ mL⁻¹ 时, 藜麦多糖的 DPPH $\cdot$ 自由基清除率与羟自由基清除率分别达到了 13.26% 与 12.71%。

在降糖功能验证方面, 本研究通过 α -淀粉酶活性抑制实验, 评估了藜麦多糖对 α -淀粉酶活性的抑制效应。实验如图 1(C)所示, 藜麦多糖对 α -淀粉酶活性具有显著的抑制效应, 且抑制率随浓度增加而显著上升。在 16 mg $\cdot$ mL⁻¹ 时, 藜麦多糖的 α -淀粉酶抑制率高达 87.44%, 显示出卓越的体外降糖活性。

以上结果不仅验证了前人关于藜麦多糖具备优秀抗氧化与降糖性能的论述, 也为后续探究其组成单糖的抗氧化能力提供了实验依据。



注: 不同处理组间小写字母不同代表结果差异显著($P < 0.05$)。

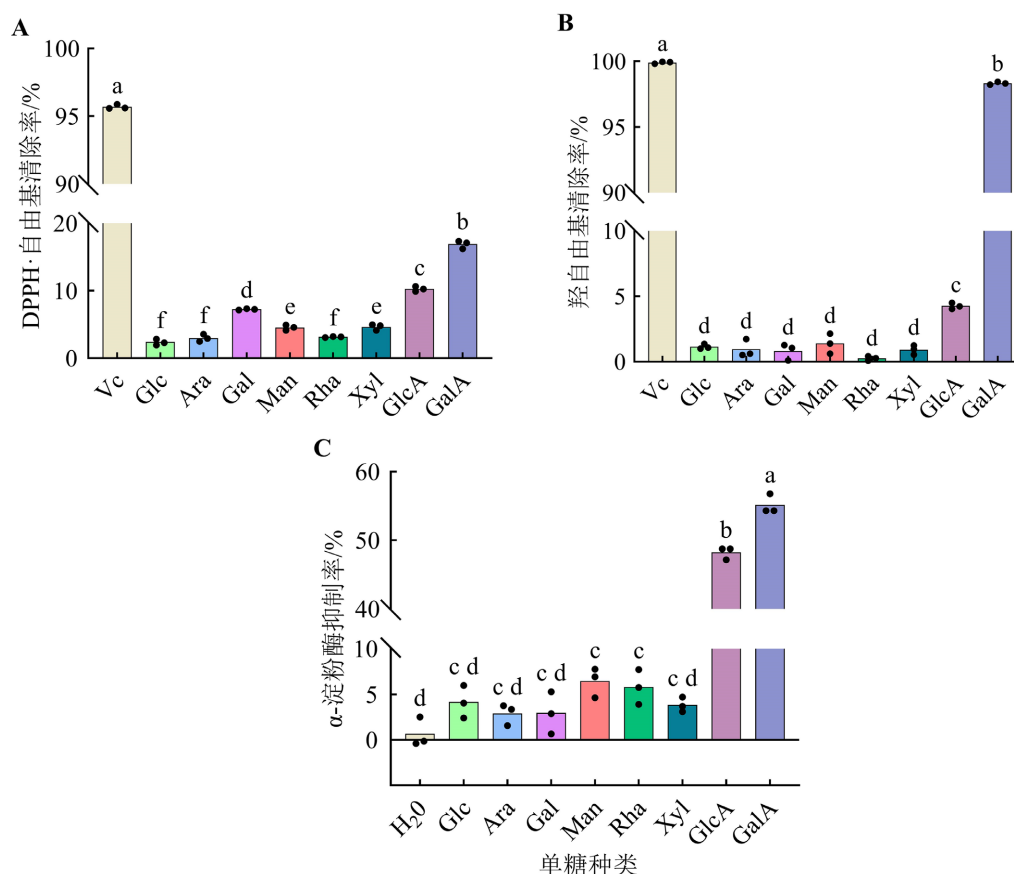
Figure 1. Fluence of polysaccharide concentration on antioxidation and alpha-amylase inhibitory activity
图 1. 多糖浓度对抗氧化和 α -淀粉酶抑制活性影响

3.2. 单糖抗氧化、降糖能力探究

鉴于植物多糖在体内通常需经过肠道微生物的复杂分解过程, 转化为单糖后才能被人体或肠道菌群进一步吸收利用[12][18], 本研究进一步探究了藜麦多糖中组成单糖的抗氧化及降糖能力。结合前人的研究结果[16][19][20], 本实验共选取了藜麦多糖的 8 种组成单糖作为实验对象, 分别是葡萄糖(Glc)、阿拉伯糖(Ara)、半乳糖(Gal)、甘露糖(Man)、鼠李糖(Rha)、木糖(Xyl)、葡萄糖醛酸(GlcA)和半乳糖醛酸(GalA)。

以各标准单糖为样品, 测定了其 DPPH· 自由基及羟自由基清除率。结果如图 2(A)、图 2(B)所示, 相比于其他单糖, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸在 $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时表现出了显著的抗氧化能力($P < 0.05$)。其中, 葡萄糖醛酸的 DPPH· 自由基清除率和羟自由基清除率分别为 10.27% 和 4.26%, 而半乳糖醛酸的清除率则分别高达 16.90% 和 98.32%。特别值得注意的是, 半乳糖醛酸的羟自由基清除效果是同浓度葡萄糖醛酸清除率的 23 倍, 接近阳性对照 Vc 的清除率。这一结果表明, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸在体外有良好的抗氧化能力, 尤其是半乳糖醛酸, 其抗氧化性能尤为突出。

在降糖能力探究方面, 实验通过 α -淀粉酶活性抑制实验, 评估了各标准单糖对 α -淀粉酶活性的抑制效应。结果如图 2(C)所示, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸对 α -淀粉酶活性具有显著的抑制效应, 在 $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸的 α -淀粉酶抑制率分别为 48.24% 和 55.14%, 而相比之下, 其他单糖如阿拉伯糖的抑制率则较低, 仅为 2.90%。这一结果表明, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸不仅具有良好的抗氧化能力, 还具备显著的降糖能力。



注: 不同处理组间小写字母不同代表结果差异显著($P < 0.05$)。

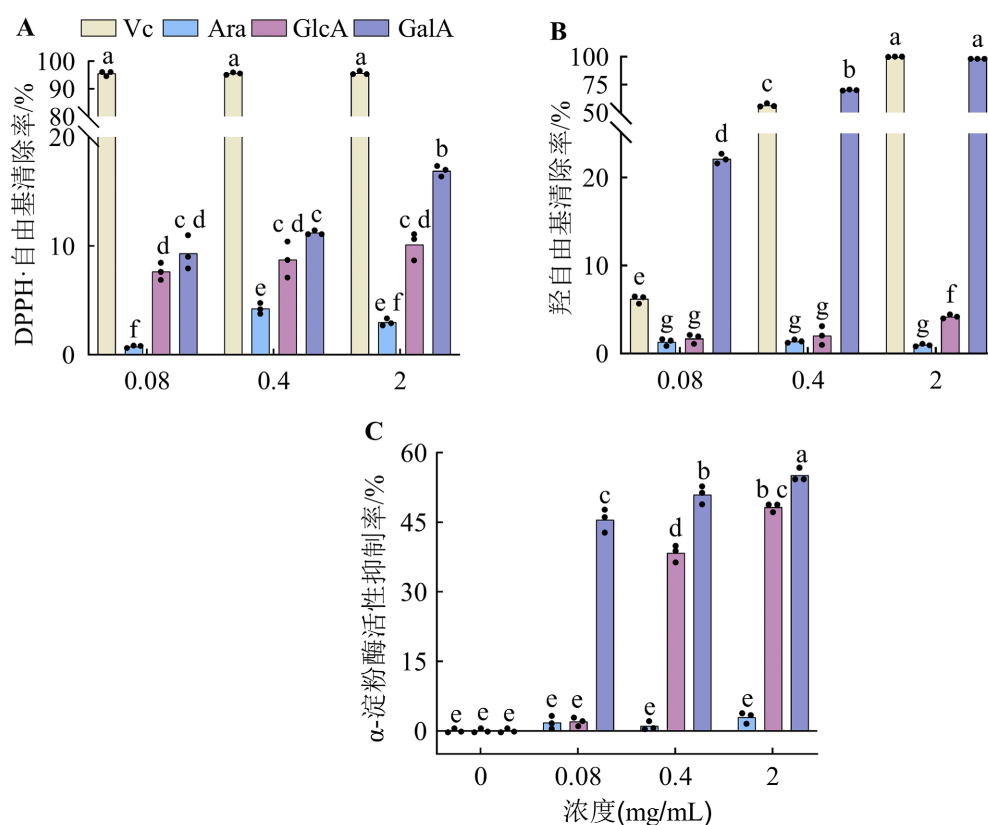
Figure 2. Comparison of antioxidant and alpha-amylase inhibitory activities of different monosaccharides
图 2. 不同单糖的抗氧化和 α -淀粉酶抑制活性对比

3.3. 单糖量效关系验证试验结果

为进一步深入探究葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸这两种糖醛酸的体外抗氧化与降糖能力是否存在浓度效应, 本研究进行了更为详尽的量效关系验证试验。考虑到阿拉伯糖在肥胖、二型糖尿病等代谢相关疾病中已有较为充分的研究[21], 本试验以阿拉伯糖为对照, 通过设定不同浓度梯度, 对这两种糖醛酸的抗氧化性能和 α -淀粉酶抑制活性进行了系统评估。

在 DPPH 自由基清除试验中, 结果如图 3(A)所示, 葡萄糖醛酸在 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $2 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下的 DPPH·自由基清除率分别为 7.66%、8.75%、10.14%, 清除率逐渐提升, 但增幅相对较小。相比之下, 半乳糖醛酸的清除率则表现出更为显著的浓度依赖性, 其清除率从 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的 9.32% 迅速提升至 $2 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的 16.91%, 增幅较大。结果表明, 半乳糖醛酸在 DPPH·自由基清除方面具有较高的活性, 且其活性随浓度增加而显著增强。

羟自由基清除试验结果同样支持了葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸具有显著抗氧化活性的结论。结果如图 3(B)所示, 葡萄糖醛酸在 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $2 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下的羟自由基清除率分别为 1.72%、2.04%、4.21%, 虽然清除率相对较低, 但呈现出明显的浓度依赖性。半乳糖醛酸的清除率则更为突出, 从 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的 22.12% 迅速提升至 $2 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的 98.30%, 几乎接近阳性对照 Vc 的清除率(99.98%)。这一结果表明, 半乳糖醛酸在羟自由基清除方面具有极高的活性, 且其活性随浓度增加而显著增强。



注: 不同处理组间小写字母不同代表结果差异显著($P < 0.05$)。

Figure 3. The concentration of uronic acid affects the activity of antioxidant and α -amylase inhibition
图 3. 糖醛酸浓度对抗氧化和 α -淀粉酶抑制活性的影响

在 α -淀粉酶抑制试验中, 如图 3(C)所示, 葡萄糖醛酸在 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $2 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下的 α -淀粉酶抑制率分别为 1.97%、38.38%、48.24%, 抑制率随浓度增加而逐渐提升。半乳糖醛酸的抑制率则更为显著, 从 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的 45.54% 迅速提升至 $2 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的 55.14%, 表现出极强的 α -淀粉酶抑制活性。这一结果表明, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸在调节糖代谢方面具有较高的潜力, 能够通过抑制 α -淀粉酶活性来减缓葡萄糖的释放速度, 从而有助于血糖的稳定。

4. 结果与讨论

本研究通过体外实验系统评估了藜麦多糖及其组成单糖的抗氧化和降糖活性。结果显示, 藜麦多糖在 $4 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时对 DPPH 自由基和羟自由基的清除率分别为 13.26% 和 12.71%, 在 $16 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时对 α -淀粉酶的抑制率高达 87.44%。这些结果表明藜麦多糖具有显著的抗氧化和降糖潜力。

进一步分析发现, 藜麦多糖中的葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸是其主要活性成分。在 $2 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 半乳糖醛酸的羟自由基清除率高达 98.32%, 接近阳性对照维生素 C, 其 α -淀粉酶抑制率为 55.14%; 而葡萄糖醛酸的 DPPH 自由基清除率为 10.27%, α -淀粉酶抑制率为 48.24%。量效关系实验表明, 这两种单糖的抗氧化和降糖活性随浓度增加而显著增强, 表现出明显的浓度依赖性。

从分子机制上看, 葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸的活性可能与其化学结构密切相关。这两种单糖均含有丰富的羟基和羧基官能团, 能够与自由基发生化学反应, 从而中和自由基的活性, 表现出显著的抗氧化能力。此外, 这些官能团可能通过与 α -淀粉酶的活性位点结合, 形成氢键或静电相互作用, 从而抑制酶

的催化活性, 延缓淀粉的消化和吸收, 进而发挥降糖作用。这种机制与天然降糖抑制剂(如阿卡波糖)的作用方式类似。

近年来, 糖醛酸与抗氧化、降糖活性间的关联日益受到重视。研究显示, 伞形蓼中的多糖 PUP80S1 相较于 PUP60S2, 含有更丰富的糖醛酸残基, 并展现出更强的抗氧化活性[22]。同样, 姬松茸中的多糖 ABMP-F 和 ABMP-V, 因其高糖醛酸残基含量, 在自由基清除能力上超越其他多糖[23]。这些发现虽初步揭示了糖醛酸单元对多糖功能性的潜在影响, 却尚未充分探讨糖醛酸本身的应用潜力。从市场需求视角审视, 抗氧化与降糖功能的食品在糖尿病、心血管疾病的预防与控制中展现出巨大潜力[24] [25]。然而, 鉴于当前糖醛酸研究缺乏体内实验数据, 直接摄入糖醛酸可能伴随安全风险。因此, 对于肥胖或二型糖尿病患者而言, 通过摄入如藜麦多糖这类含糖醛酸的多糖, 或能成为管理疾病的可行方式。

尽管本研究主要基于体外实验, 但这些发现为未来的体内实验和临床研究奠定了坚实基础。未来进一步验证这两种糖醛酸在体内的生物活性及其代谢机制, 将有望揭示葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸在预防肥胖或糖尿病等代谢疾病中的应用潜力。我们希望在充分研究后, 将这两种糖醛酸纳入食品与药物开发中, 为肥胖或糖尿病等代谢疾病的预防与管理提供更多选项。

基金项目

全国生物技术职业教育教学指导委员会共同体建设研究项目(GTTXM202403); 北京农业职业学院科技创新项目(XY-YF-20-06); 北京农业职业学院学生双创项目(XY-XK-23-05)。

参考文献

- [1] 张亚萍, 王致和, 张秀华, 等. 14 个藜麦品种(系)在祁连山区的农艺性状表现及其与产量的关系分析[J]. 山东农业科学, 2021, 53(8): 17-21.
- [2] 董晶, 张焱, 曹赵茹, 等. 藜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.
- [3] 温映红, 丁超, 李素娟, 等. 山西静乐藜麦产业发展现状及对策建议[J]. 河北农业科学, 2021, 25(4): 19-21.
- [4] 杨敏, 奚军伟. 黑藜麦多糖超声辅助提取工艺及其抗氧化活性、稳定性研究[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(8): 160-166.
- [5] Fan, S., Li, J. and Bai, B. (2019) Purification, Structural Elucidation and *in Vivo* Immunity-Enhancing Activity of Polysaccharides from Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Seeds. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, **83**, 2334-2344. <https://doi.org/10.1080/09168451.2019.1650635>
- [6] 刘月瑶, 路飞, 高雨晴, 等. 藜麦的营养价值、功能特性及其制品研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 56-65.
- [7] 张亚坤, 王金荣, 黄进, 等. 多糖的磷酸化修饰及其生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8172-8177.
- [8] Wang, L., Li, C., Huang, Q. and Fu, X. (2019) Polysaccharide from *Rosa roxburghii* Tratt Fruit Attenuates Hyperglycemia and Hyperlipidemia and Regulates Colon Microbiota in Diabetic *db/db* Mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **68**, 147-159. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06247>
- [9] Cao, C., Zhang, B., Li, C., Huang, Q., Fu, X. and Liu, R.H. (2019) Structure and *in Vitro* Hypoglycemic Activity of a Homogenous Polysaccharide Purified from *Sargassum pallidum*. *Food & Function*, **10**, 2828-2838. <https://doi.org/10.1039/c8fo02525h>
- [10] Wu, J., Chen, M., Shi, S., Wang, H., Li, N., Su, J., *et al.* (2017) Hypoglycemic Effect and Mechanism of a Pectic Polysaccharide with Hexenuronic Acid from the Fruits of *Ficus pumila* L. in C57BL/KsJ *db/db* Mice. *Carbohydrate Polymers*, **178**, 209-220. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.050>
- [11] Tan, M., Chang, S., Liu, J., Li, H., Xu, P., Wang, P., *et al.* (2020) Physicochemical Properties, Antioxidant and Antidiabetic Activities of Polysaccharides from Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Seeds. *Molecules*, **25**, Article No. 3840. <https://doi.org/10.3390/molecules25173840>
- [12] Yang, Q., Chang, S., Zhang, X., Luo, F., Li, W. and Ren, J. (2024) The Fate of Dietary Polysaccharides in the Digestive Tract. *Trends in Food Science & Technology*, **150**, Article ID: 104606. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104606>
- [13] 李佳妮, 白宝清, 金晓第, 等. 酶解超声波协同提取藜麦多糖及体外活性评价[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(8):

57-64.

- [14] 袁俊杰, 蒋玉蓉, 孙雪婷, 等. 藜麦多糖提取工艺的响应面法优化及其品种差异[J]. 食品科技, 2016, 41(1): 162-167.
- [15] 徐澜, 郭晨晨, 赵慧. 超声波辅助提取藜麦多糖及其抑菌性与抗氧化性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 143-146.
- [16] 林冰洁, 毛肇洁, 余远, 等. 藜麦麸皮多糖的提取及理化性质和活性研究[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 171-178.
- [17] 李奕葶, 王文振, 赵嘉伟, 等. 真姬菇菌丝体发酵藜麦产物中多糖的抗氧化和 α -淀粉酶抑制活性[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(2): 19-27.
- [18] Wardman, J.F., Bains, R.K., Rahfeld, P. and Withers, S.G. (2022) Carbohydrate-Active Enzymes (Cazymes) in the Gut Microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, **20**, 542-556. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00712-1>
- [19] 李佳妮. 藜麦多糖分离纯化、结构鉴定及免疫活性研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 山西大学, 2020.
- [20] 刘树兴, 任益平, 李浩恒, 等. 藜麦多糖的分离纯化及结构初步分析[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(10): 48-52.
- [21] Xu, M., Shi, F., Gao, Y., Han, S., Huang, C., Hou, Q., *et al.* (2024) Arabinose Confers Protection against Intestinal Injury by Improving Integrity of Intestinal Mucosal Barrier. *International Immunopharmacology*, **126**, Article ID: 111188. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2023.111188>
- [22] He, P., Zhang, A., Zhang, F., Linhardt, R.J. and Sun, P. (2016) Structure and Bioactivity of a Polysaccharide Containing Uronic Acid from *Polyporus umbellatus* Sclerotia. *Carbohydrate Polymers*, **152**, 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.07.010>
- [23] Wu, S., Li, F., Jia, S., Ren, H., Gong, G., Wang, Y., *et al.* (2014) Drying Effects on the Antioxidant Properties of Polysaccharides Obtained from *Agaricus blazei* Murrill. *Carbohydrate Polymers*, **103**, 414-417. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.11.075>
- [24] Dong, Y., Wang, Z., Chen, C., Wang, P. and Fu, X. (2023) A Review on the Hypoglycemic Effect, Mechanism and Application Development of Natural Dietary Polysaccharides. *International Journal of Biological Macromolecules*, **253**, Article ID: 127267. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127267>
- [25] Gong, L., Feng, D., Wang, T., Ren, Y., Liu, Y. and Wang, J. (2020) Inhibitors of α -amylase and α -glucosidase: Potential Linkage for Whole Cereal Foods on Prevention of Hyperglycemia. *Food Science & Nutrition*, **8**, 6320-6337. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1987>