

不同杂粮多糖的体外抗氧化、益生和抗癌活性比较

杨斯惠, 马明芳, 曹亚楠, 任远航, 万燕, 邹亮, 彭镰心

Comparison of *in Vitro* Antioxidant, Probiotic and Anticancer Activities of Different Coarse Cereal Polysaccharides

YANG Sihui, MA Mingfang, CAO Ya'nang, REN Yuanhang, WAN Yan, ZOU Liang, and PENG Lianxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070332>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山药多糖和燕麦多糖发酵产酸及发酵产物对结肠癌细胞的增殖抑制作用

Acid production of the polysaccharides from yam and oat in vitro fermentation as well as the growth inhibition of the fermentation products on human colon cancer cells

食品工业科技. 2017(15): 296-301

麦麸阿魏酸糖酯微生物发酵工艺优化及体外抗氧化和益生活性评价

Optimization of Fermentation Process for Feruloylated Glycosides from Wheat Bran and Evaluation of Its Antioxidant and Probiotic Activities *in Vitro*

食品工业科技. 2021, 42(2): 138-145,160

玻璃和不锈钢容器发酵水豆豉的乙醇提取物对结肠癌细胞的体外凋亡诱导效果比较

In vitro apoptosis inducing effects comparison of ethanol extracts of glass and stainless steel vessels fermented Shuidouchi in colon cancer cells

食品工业科技. 2017(10): 345-350

玉米芯多糖的微生物发酵工艺及其单糖组成和体外益生活性研究

Study on Microbial Fermentation Technology of Corn Cob Polysaccharide and Its Monosaccharide Composition and Prebiotic Activity *in Vitro*

食品工业科技. 2020, 41(5): 107-112

不同品种山药的营养成分分析及其水提物的体外抗氧化能力研究

Analysis of nutritious compositions in *Rhizoma Dioscoreae* from different varieties and antioxidant properties of their water extracts *in vitro*

食品工业科技. 2018, 39(4): 6-11

杂粮多酚功能活性研究进展

Research progress of functional activities of polyphenols in coarse cereals

食品工业科技. 2017(14): 326-329



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

· 青年编委专栏—杂粮与主粮复配的营养学基础 (客座主编: 彭镰心、李志江) ·

客座主编寄语: 杂粮富含多种营养成分与活性因子, 在膳食结构中具有重要地位。杂粮与主粮的复配食用, 是一种常见的膳食模式, 通过与主粮合理搭配, 可满足不同人群的营养需求。近年来, 饮食失衡引起的慢性代谢性疾病高发, 严重影响人们的生活质量。挖掘杂粮营养价值并由此指导合理饮食, 是维护机体健康有效、安全的策略, 具有重要研究价值和意义。

杨斯惠, 马明芳, 曹亚楠, 等. 不同杂粮多糖的体外抗氧化、益生和抗癌活性比较 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 1-10. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070332

YANG Sihui, MA Mingfang, CAO Ya'nan, et al. Comparison of *in Vitro* Antioxidant, Probiotic and Anticancer Activities of Different Coarse Cereal Polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 1-10. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070332

不同杂粮多糖的体外抗氧化、益生和 抗癌活性比较

杨斯惠^{1,2}, 马明芳³, 曹亚楠^{1,2}, 任远航^{1,2}, 万 燕¹, 邹 亮^{1,2}, 彭镰心^{1,2,*}

(1. 成都大学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;

3. 青海省产品质量检验检测院, 青海西宁 810004)

摘要: 以燕麦、薏米、藜麦、糙米、黄小米、大麦、青稞、苦荞、黑麦为原料, 小麦作为对照, 采用水提醇沉法分别提取获得 10 种多糖, 测定、比较其抗氧化活性、抑制结肠癌细胞 HCT116 活性以及对益生菌生长的影响, 筛选出体外活性强的多糖。本研究采用 DPPH、ABTS 和羟自由基法研究不同多糖的体外抗氧化活性, 采用 MTT 法检测不同多糖在 48、72 h 对 HCT116 细胞增殖抑制作用, 通过长双歧杆菌、短双歧杆菌、青春双歧杆菌和鼠李糖乳杆菌分别体外培养的方法研究其对益生菌生长的影响。结果表明, 不同杂粮多糖体外活性存在显著性差异。十种多糖对 DPPH、ABTS 和羟自由基均具有清除能力。其中, 苦荞多糖对三种自由基的清除能力最强, 分别为 12.76 $\mu\text{mol Trolox/g DW}$ 、39.56 $\mu\text{mol Trolox/g DW}$ 和 1615.32 $\mu\text{mol V}_C/\text{g DW}$ 。在对益生菌生长的影响上, 1% 浓度的黄小米、大麦、燕麦多糖能够更易被短双歧杆菌、青春双歧杆菌和鼠李糖乳杆菌选择利用。在 48 h 下多糖抑制 HCT116 细胞增殖的活性强弱: 小麦>糙米>薏米>大麦>黄小米, 在 72 h 下多糖抑制 HCT116 细胞增殖的活性强弱: 小麦>薏米>糙米>黄小米>大麦。实验结果将为杂粮品质评价提供参考, 为功能性食品开发中原料的选择提供依据。

关键词: 杂粮多糖, 抗氧化, 益生活性, 抗结肠癌细胞

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)01-0001-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070332



本文网刊:

Comparison of *in Vitro* Antioxidant, Probiotic and Anticancer Activities of Different Coarse Cereal Polysaccharides

YANG Sihui^{1,2}, MA Mingfang³, CAO Ya'nan^{1,2}, REN Yuanhang^{1,2}, WAN Yan¹, ZOU Liang^{1,2}, PENG Lianxin^{1,2,*}

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

2. Sichuan Province Engineering Technology Research Center of Coarse Cereal Industrialization, Chengdu 610106, China;

3. Qinghai Product Quality Inspection and Testing Institute, Xining 810004, China)

Abstract: Taking oat, adlay, quinoa, brown rice, yellow millet, barley, highland barley, tartary buckwheat, and rye as raw

收稿日期: 2022-08-02

基金项目: 成都市科技局技术创新研发项目 (2022-YF05-00413-SN); 四川省科技计划项目 (2022YFQ0041)。

作者简介: 杨斯惠 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 杂粮精深加工与功效评价, E-mail: 897085663@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。

materials, and wheat as a control, 10 kinds of polysaccharides were obtained by water extraction and alcohol precipitation, respectively. The antioxidant activity of different polysaccharides, the inhibition of HCT116 activity of colon cancer cells and the effect on the growth of probiotics were determined and compared, and the polysaccharides with strong *in vitro* activity were screened out. In this study, DPPH, ABTS and hydroxyl radical assays were used to study the *in vitro* antioxidant activities of different polysaccharides, and MTT assay was used to detect the inhibitory effects of different polysaccharides on the proliferation of HCT116 cells at 48 and 72 h. *Bifidobacterium longum* Reuter, *Bifidobacterium breve* Reuter, *Bifidobacterium adolescentis* and *Lactobacillus rhamnosus* were cultured *in vitro* to study their effects on the growth of probiotics. The results showed that there were significant differences in the *in vitro* activities of different coarse cereal polysaccharides. Ten kinds of polysaccharides had scavenging abilities to DPPH, ABTS and hydroxyl radicals. Among them, tartary buckwheat polysaccharide had the strongest scavenging ability to three free radicals, which were 12.76 $\mu\text{mol Trolox/g DW}$, 39.56 $\mu\text{mol Trolox/g DW}$ and 1615.32 $\mu\text{mol V}_C/\text{g DW}$, respectively. In terms of the effect on the growth of probiotics, 1% concentration of yellow millet, barley and oat polysaccharides could be more easily selected and utilized by *Bifidobacterium breve* Reuter, *Bifidobacterium adolescentis* and *Lactobacillus rhamnosus*. At 48 h, the inhibitory activity of polysaccharide on HCT116 cell proliferation was as follows: Wheat>brown rice>adlay>yellow millet; at 72 h, the inhibitory activity of polysaccharide on HCT116 cell proliferation was as follows: Wheat>adlay>brown rice>yellow millet>barley. The experimental results would provide reference for the quality evaluation of miscellaneous coarse cereals, and provide the basis for the selection of raw materials in the development of functional food.

Key words: coarse cereal polysaccharides; antioxidation; probiotics; against colon cancer cells

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^[1],具有生育期短、种植面积小、地域性强、种植方法特殊等种植特点^[2]。谷类杂粮主要包括大麦、小米、青稞、燕麦、荞麦等;豆类杂粮主要有绿豆、芸豆、蚕豆、豌豆等^[3]。随着人们对膳食结构多样化和饮食均衡化重视的加深,人们逐步发现在调节饮食结构和均衡膳食方面,杂粮是日常饮食中不可或缺的部分。与功能活性含量较低的稻谷、小麦相比,种类繁多的杂粮营养成分含量更高^[3],其富含膳食纤维、维生素、矿物质等营养物质^[4],具有细粮不可替代的地位。我国作为杂粮生产大国,具有悠久的杂粮饮食文化,可杂粮产品主要集中于原粮,加工产品低端,如何充分利用杂粮生理功能活性物质是杂粮开发的方向之一。多糖物质(如 β -葡聚糖、阿拉伯木聚糖、纤维素)作为杂粮营养组成的重要部分,对其功能活性深入研究于杂粮行业发展具有积极的意义。

多糖是由 10 个或 10 个以上的单糖经过糖苷键聚合、脱水形成的天然高分子化合物^[5],主要分布于动物、植物、藻类及微生物中^[6]。根据来源不同,多糖可以被分为动物多糖、植物多糖和微生物多糖^[7]。作为多糖中的一种,广泛存在于自然界植物体中的植物多糖具有多种生物活性,如抗氧化、抗肿瘤、抗肝损伤、降血糖、益生作用等^[8-9]。多糖作为结构复杂的高分子化合物,其功能特性与结构、物理性质密切相关。因此,对多糖提取、分离技术的探究成为了研究多糖的铺垫。目前,对多糖提取工艺的研究有热水浸提、酸提法、碱提法、超声波提取法等。其中,热水浸提法是多糖中最常用的提取方法,具有经济、便捷、能较好地保存分子结构的特点。

近年来,植物多糖在加工、结构和生物活性方面备受关注,成为越来越多科研工作者的研究热点。其

中针对杂粮多糖的研究也逐步增加。Hu 等^[10]通过 DPPH 法和 ABTS 法评估了柱层析纯化后藜麦多糖的抗氧化能力,结果显示,藜麦多糖对 DPPH 和 ABTS 自由基表现出显著的抗氧化活性。Qian 等^[11]采用超声辅助法提取大麦多糖,发现大麦多糖在总还原能力、清除 DPPH 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基等方面具有抗氧化活性。Sargautiene 等^[12]探索了燕麦非淀粉多糖潜在益生作用,发现地衣芽孢杆菌可以对燕麦非淀粉多糖进行预消化,降低其 β -葡聚糖的高粘度,使其他细菌能够更容易利用半纤维素。Lin 等^[13]发现不同分子量的青稞 β -葡聚糖对结肠癌细胞 HCT116 的体外生长抑制作用无明显差异,分子质量较低的青稞 β -葡聚糖也具有较强的抗癌活性。虽然杂粮多糖的不同生物活性被逐步揭示,但目前研究更多集中于单种杂粮多糖的提取分离纯化、理化特性及某种活性探究,由于提取、分析方法的差异,可比性不足,不利于杂粮的综合评价。

本研究以燕麦、薏米、藜麦、糙米、黄小米、大麦、青稞、苦荞、黑麦为原料,小麦作为对照,通过测定、比较 10 种多糖的抗氧化活性、抑制结肠癌细胞 HCT116 活性以及对益生菌生长的影响,综合评价,筛选出活性强的多糖。以多糖为切入点,揭示其在杂粮中的功能作用,明确不同杂粮多糖的功效差异,为杂粮功能性产品的开发和杂粮多糖的合理利用提供理论依据,奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦、燕麦、薏米、藜麦 赣州康瑞农产品有限公司;糙米、黄小米、大麦 福建盛耳食品有限公司;青稞 沈阳信昌粮食贸易有限公司;苦荞 云南健爽科技有限公司;黑麦 涑水县金谷粮油食品有限公司;耐高温 α -淀粉酶(活性 5 万 U/g)、高转化率糖化

酶(活性 10 万 U/g) 河南万邦化工科技有限公司; 中性蛋白酶(活性 10 万 U/g) 南宁东恒华道生物科技有限公司; 长双歧杆菌(ATCC 15707)、短双歧杆菌(ATCC 15700)、青春双歧杆菌(ATCC 15703)、鼠李糖乳杆菌(ATCC 53103) 明州生物科技有限公司(中国宁波); MRS 培养基(不含葡萄糖) 山东拓普生物工程有限公司; TPY 液体培养基 青岛高科技工业园海博生物技术有限公司; HCT116 细胞 中国科学院细胞库; RPMI1640 改性培养基、胎牛血清(FBS, Fetal bovine serum) Gibco 公司; NaOH(片状)、盐酸、无水葡萄糖、硫酸、苯酚、L(+)-抗坏血酸(V_C)、硫酸亚铁、水杨酸 分析纯, 成都市科隆化学制品有限公司; 30% H_2O_2 分析纯, 成都市科龙化工试剂厂; Trolox 标准品(水溶性 V_E)、ABTS 标准品、过硫酸钾 上海麦克林生化科技有限公司; DPPH 标准品 上海源叶生物科技有限公司。

FE28 型 pH 计 梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司; XMTD-7000 恒温水浴锅 北京市永光明医疗仪器有限公司; FD-2 型真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司; Synergy HTX 多功能微孔板检测仪酶标仪 美国伯腾仪器有限公司; UPH-1-10T 型超纯水制造系统 四川优普超纯科技有限公司; LDZX-50KB 型高压蒸汽灭菌锅 上海中安医疗机构厂; DHP-9160B 生化培养箱 上海琅琅实验设备有限公司; JJ-CJ-IFD 超净工作台 苏州市金净净化设备科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 多糖的提取、分离 参考曾海龙^[14]、王希^[15]的方法, 略作修改。称取 100 g 灭酶原料(原料米 85 °C 烘 1 h 灭内源酶活, 备用), 采用热水提取法, 料液比为 1:20(g/mL), 在 100 °C 浸提 2 h, 过滤取上清液。调节溶液至 pH5.5, 在溶液中加入 0.5 g 耐高温 α -淀粉酶, 93 °C 水浴 30 min; 加入 1 g 高转化率糖化酶, 60 °C 水浴处理 30 min。在水浴温度 55 °C 下, 再加入 2 g 中性蛋白酶, 反应 30 min, 再加热至 100 °C 灭酶 10 min, 收集酶解液。酶解液以 1 mol/L NaOH 液调至 pH8.0, 添加 30% H_2O_2 至浅黄色, 于 50 °C 下水浴加热 2 h。浓缩液体到原体积的 1/4, 向多糖溶液中逐渐加入 4 倍体积的无水乙醇, 使体系中乙醇最终体积达到 80%, 4 °C 静置 24 h, 离心取沉淀, 冷冻干燥得粗多糖样品。

1.2.2 多糖含量的测定 参考杨雅蛟等^[16]的方法, 略作修改。取干燥后的多糖样品用蒸馏水配制成浓度 0.2 mg/mL 的多糖溶液, 备用。以无水葡萄糖为对照品(回归方程为 $y=5.6483x+0.0094$, $R^2=0.9993$), 采用苯酚-硫酸法测定多糖含量。取 1 mL 多糖溶液, 加入质量分数为 5% 的苯酚溶液 1.0 mL, 混合均匀后迅速加入浓硫酸 5.0 mL, 置于 40 °C 水浴条件下反应 30 min, 将反应得到的溶液在波长 490 nm 处测吸光值。

1.2.3 体外抗氧化活性测定

1.2.3.1 DPPH 自由基清除率的测定 取干燥后的多糖样品用蒸馏水配制成浓度 5 mg/mL 的多糖溶液。取 2 mL 5 mg/mL 多糖溶液, 加入 2 mL DPPH 溶液, 混匀暗反应 30 min, 在波长为 517 nm 处测定吸光度 A_1 ; 取 2 mL 5 mg/mL 多糖溶液与 2 mL 无水乙醇溶液反应测定吸光度 A_2 ; 2 mL 无水乙醇溶液与 2 mL DPPH 溶液反应测定吸光度 A_0 ^[17-18]。按下式计算样品的 DPPH 自由基清除率。以 Trolox 标准品为对照品, 试验结果以每 1 g 干重(DW)样品中等量 Trolox(μ mol)表示: μ mol Trolox/g DW。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = [A_0 - (A_1 - A_2)] / A_0 \times 100$$

1.2.3.2 ABTS 自由基清除率的测定 参考李巨秀等^[19]的方法, 略作修改。取干燥后的多糖样品用蒸馏水配制成浓度 3 mg/mL 的多糖溶液。取 1 mL 3 mg/mL 多糖溶液, 加入 4 mL ABTS 溶液, 混匀暗反应 10 min, 在波长为 734 nm 处测定吸光度 A_1 ; 取 1 mL 3 mg/mL 多糖溶液与 4 mL 无水乙醇溶液反应测定吸光度 A_2 ; 1 mL 蒸馏水与 4 mL ABTS 溶液反应测定吸光度 A_0 。按下式计算样品的 ABTS 自由基清除率。以 Trolox 标准品为对照品, 试验结果以每 1 g 干重(DW)样品中等量 Trolox(μ mol)表示: μ mol Trolox/g DW。

$$\text{ABTS 自由基清除率}(\%) = [A_0 - (A_1 - A_2)] / A_0 \times 100$$

1.2.3.3 羟自由基(\bullet OH)清除率的测定 取干燥后的多糖样品用蒸馏水配制成浓度 3 mg/mL 的多糖溶液。取 2 mL H_2O_2 (9 mmol/L)、 $FeSO_4$ (9 mmol/L)、多糖溶液(3 mg/mL)混匀静置 10 min, 加入 2 mL 水杨酸(9 mmol/L), 混匀反应 30 min, 在波长为 510 nm 处测定吸光度 A_1 ; 2 mL 多糖溶液(3 mg/mL)与 6 mL 蒸馏水反应测定吸光度 A_2 ; 蒸馏水代替多糖溶液测得对应吸光度 A_0 ^[20]。按下式计算样品的羟自由基清除率。以 V_C 为对照品, 试验结果以每 1 g 干重(DW)样品中等量 V_C (μ mol)表示: μ mol V_C /g DW。

$$\text{羟自由基清除率}(\%) = [A_0 - (A_1 - A_2)] / A_0 \times 100$$

1.2.4 对益生菌生长的影响

1.2.4.1 培养基及培养条件 鼠李糖乳杆菌: MRS 培养基, 37 °C 恒温培养过夜。

长双歧杆菌、短双歧杆菌、青春双歧杆菌: TPY 培养基, 37 °C 恒温厌氧培养过夜。

1.2.4.2 生长曲线的测定 选择长双歧杆菌、短双歧杆菌、青春双歧杆菌和鼠李糖乳杆菌, 活化后($OD_{600\text{ nm}}=0.5$)以 2%(v/v)的比例接种于不添加碳水化合物的液体培养基中, 混匀后吸取 180 μ L 于无菌 96 孔板中, 加入 20 μ L 多糖溶液(1%、10%)共培养, 每个孔中多糖的最终浓度为 0.1%、1%(w/v), 每孔 200 μ L, 每组分别设置 6 个平行, 置于 37 °C 恒温培养, 每隔 4 h 检测发酵液的 $OD_{600\text{ nm}}$ 值, 根据前期预实验, 选择连续测定 40 h, 最后以时间为横坐标,

OD_{600 nm} 为纵坐标, 绘制微生物生长曲线, 以无碳水化合物培养基为空白对照, 以添加菊糖为唯一碳源的培养基为阳性对照^[21-22]。

1.2.5 体外抑制结肠癌细胞 HCT116 的活性测定
采用 MTT 法测定杂粮多糖对 HCT116 细胞增殖抑制作用。取对数生长期 HCT116 细胞, 种板到 96 孔培养板中, 每孔 100 μL, 置于 CO₂ 培养箱中培养过夜。吸弃培养基, 加入含不同浓度多糖的培养基 100 μL/孔, 每个浓度设计 5 个复孔, 将 96 孔板置于 CO₂ 培养箱中培养 48 和 72 h^[23-25]。对照组 (阴性对照) 只加细胞和新鲜培养基, 空白组不加细胞只加培养液。按下式计算样品的细胞抑制率。

细胞抑制率 (%) = [(对照组细胞 OD 值 - 实验组细胞 OD 值) / (对照组细胞 OD 值 - 空白组 OD 值)] × 100

1.3 数据处理

所有实验至少重复三次, 采用 Excel 2010 软件分析整理数据, 数据采用平均值 ± 标准差表示。采用 SPSS 23.0 统计软件对数据进行统计和分析, *P* < 0.05 表示差异显著; 采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同杂粮粗多糖的多糖含量

不同杂粮粗多糖的多糖含量如图 1 所示, 小麦、黑麦、青稞、黄小米、糙米、薏米、燕麦、大麦、藜麦、苦荞中的多糖含量分别为 37.11%、10.61%、56.74%、40.24%、45.97%、49.89%、45.61%、57.59%、42.83%、36.11%。多糖含量最高的为大麦粗多糖 (57.59%), 与之前王希^[26]报道水提法提取的大麦多糖中多糖含量为 64.29% 相接近, 本研究中过氧化氢脱色步骤可能导致部分多糖的损失^[14]; 多糖含量最低的为黑麦粗多糖 (10.61%)。

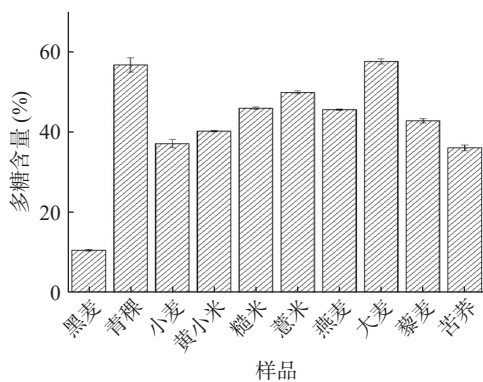


图 1 不同杂粮粗多糖的多糖含量
Fig.1 Polysaccharide content of crude polysaccharide in different coarse cereals

2.2 体外抗氧化活性分析

2.2.1 DPPH 自由基清除能力 DPPH•(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼)是一种稳定的自由基, 呈紫色, 其最大吸收波长为 517 nm, 被广泛用于评价自由基清除活性^[27-28]。如图 2 所示, 不同多糖对 DPPH 自由基清除能力具有显著性差异 (*P* < 0.05)。10 种杂粮多糖中,

苦荞多糖的 DPPH 自由基清除能力显著高于小麦多糖, 达 12.76 μmol Trolox/g DW; 而黄小米、薏米、燕麦等 5 种杂粮多糖均显著低于小麦多糖 (*P* < 0.05), 其中 DPPH 自由基清除能力最弱的是黄小米多糖。在结构研究方面, 王帅等^[29]利用最小偏二乘分析初步分析纯化后 6 种多糖的结构、性质对其体外抗氧化活性的影响, 提出单糖的组成 (葡萄糖醛酸、半乳糖和葡萄糖) 和分子量能对多糖抗氧化活性起到影响。已有报道中, 苦荞多糖主要由葡萄糖、半乳糖组成^[30], 小米多糖则由鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、葡萄糖、半乳糖组成^[31]。因此, 苦荞多糖和黄小米多糖清除 DPPH 自由基能力的差异可能是由于其单糖组成不同。除去单独存在的多糖, 多糖还可通过与蛋白质、多肽以及酚类化合物的结合向缺乏电子的自由基提供质子从而增强其抗氧化能^[32]。故苦荞多糖组清除能力强可能与多糖和酚类化合物的结合有关^[33-34]。

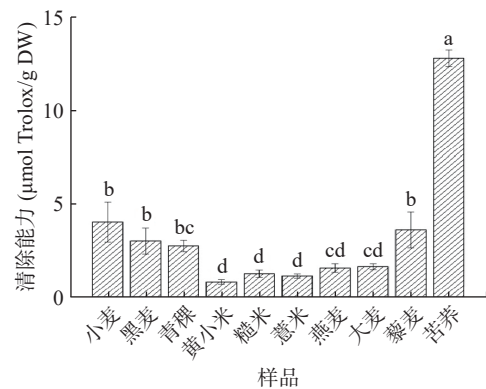


图 2 不同杂粮多糖的 DPPH 自由基清除能力
Fig.2 DPPH radical scavenging ability of different coarse cereal polysaccharides
注: 图中不同小写字母表示差异显著 (*P* < 0.05), 图 3、图 4、图 8 同。

2.2.2 ABTS 自由基清除能力 在反应体系中, ABTS 自由基与抗氧化物质结合使体系褪色, 通过测定最大吸收波长 734 nm 下吸光度的变化评价物质的抗氧化能力^[35]。不同杂粮多糖的 ABTS 自由基清除能力如图 3 所示。在 ABTS 自由基清除能力上, 不同多糖间具有显著性差异 (*P* < 0.05)。10 种多糖中苦荞多

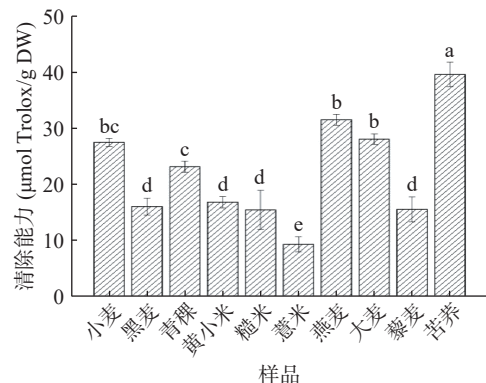


图 3 不同杂粮多糖的 ABTS 自由基清除能力
Fig.3 ABTS radical scavenging ability of different coarse cereal polysaccharides

糖显著高于小麦多糖($P<0.05$), 达 $39.56 \mu\text{mol Trolox/g DW}$, 而黑麦、黄小米、糙米、薏米和藜麦多糖均显著低于小麦多糖($P<0.05$)。与 DPPH 自由基清除能力结果不同, ABTS 自由基清除活性最弱的是薏米多糖 ($9.33 \mu\text{mol Trolox/g DW}$)。复杂易变的分子结构和物理性质是造成多糖生物活性多变的重要原因。其中, 单糖的组成和摩尔比是影响多糖的抗氧化活性的因素之一。孙元彬等^[36]对纯化得到的苦荞多糖进行单糖组成分析, 发现其只含有葡萄糖和少量的木糖。庄玮婧^[37]发现水提法得到的薏米多糖由 L-鼠李糖、L-阿拉伯糖、D-葡萄糖、D-半乳糖、D-木糖、D-甘露糖六种单糖组成。因此, 葡萄糖含量高可能是苦荞多糖 ABTS 自由基清除能力强的原因。从杏鲍菇菇头^[38]中提取的主要由葡萄糖组成(占 84.4%)的多糖对 ABTS 自由基具有较强的淬灭作用也印证了多糖的单糖组成与抗氧化活性具有相关性这一观点。同时与 DPPH 自由基清除能力结果不同, 在 ABTS 反应体系中, 10 种多糖清除率明显增大, 这可能与 ABTS 的亲水亲脂特性及较大空间位阻有关^[39]。

2.2.3 羟自由基($\cdot\text{OH}$)清除能力 羟自由基是活性氧中最具活力的, 具有很强的电子氧化能力, 是最有毒害的自由基, 可对相邻的生物分子造成损害^[40-41], 加快生物体衰老, 诱发疾病^[42]。因此, 清除羟自由基是体现多糖抗氧化作用的重要指标之一。不同杂粮多糖的羟自由基清除能力如图 4 所示。不同杂粮粗多糖间羟自由基清除能力有显著差异($P<0.05$)。10 种多糖中, 苦荞多糖的羟自由基清除能力显著高于小麦多糖($P<0.05$), 达 $1615.32 \mu\text{mol V}_c/\text{g DW}$, 而与 DPPH、ABTS 自由基清除能力结果不同, 仅燕麦多糖活性低于小麦多糖。苦荞多糖比燕麦多糖表现出更高的羟自由基清除能力, 这可能是由于其糖醛酸含量较高, 糖醛酸含量的增加能增进多糖的还原能力并减少羟自由基的产生^[43]。据报道, 苦荞可溶性膳食纤维中含有糖醛酸 26.10%^[44], 燕麦多糖含糖醛酸 5.9%^[45]。研究表明, 糖醛酸含量较高(33.27%±0.10%)的硫酸化凉草粉多糖自由基清除效果更佳^[46], 这与之

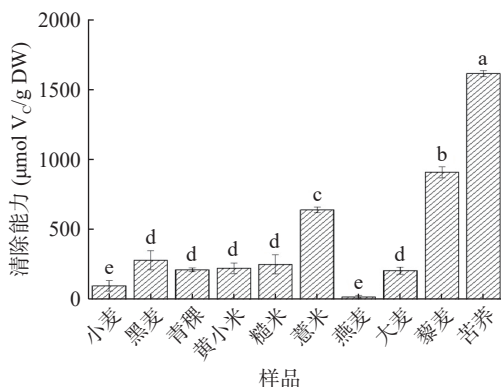


图 4 不同杂粮多糖的羟自由基清除能力

Fig.4 Hydroxyl radical scavenging ability of different coarse cereal polysaccharides

前 Zhang 等^[47]的推测相似。同时, 比较裙带菜中不同分子质量岩藻多糖的抗氧化性发现, 低分子质量(分子质量小于 $1 \times 10^4 \text{ u}$)岩藻多糖对羟自由基清除能力更佳^[48]。但鉴于本研究中未进行多糖分子量测定, 仍需进一步验证。此外, 苦荞中富含黄酮类物质, 李宁等^[49]发现通过优化联合提取工艺即水提醇沉法可以提高苦荞籽中的黄酮和多糖的提取率。之前的研究证明, 苦荞黄酮粗提物具有清除羟自由基的能力, 可随着对黄酮粗提物的精制, 清除羟自由基的效果有所下降^[50], 故苦荞多糖表现出具有较强的抗氧化作用可能与黄酮的协同作用有关。

本研究通过三种方法对不同杂粮多糖的抗氧化活性进行测定。总体而言, 苦荞多糖表现出了良好的抗氧化能力。而不同多糖在 DPPH、ABTS 和羟自由基清除效果具有一定的差异。特别是小麦对照在清除 DPPH、ABTS 自由基上表现出优于部分杂粮多糖, 但对羟自由基清除能力较弱。阿拉伯木聚糖, 也称为戊聚糖, 作为一种非淀粉多糖广泛存在于谷物中, 特别在小麦籽粒中尤为丰富^[51]。因其分子结构中具有一定的阿魏酸基团, 阿拉伯木聚糖具有抗氧化活性^[52]。在之前的报道中, 具有较高的分子量和酯化阿魏酸的阿拉伯木聚糖被认为是较好的抗氧化剂^[52-53]。Chen 等^[53]发现低取代度有益于阿拉伯木聚糖表现出更强的羟自由基清除活性, 与之相反, 阿拉伯木聚糖的 DPPH 自由基清除活性随取代度的增加而提高, 因为取代度越高的阿拉伯木聚糖更易分散到反应混合物中参与氧化还原反应。因此, 对照小麦中阿拉伯木聚糖取代度较高可能是清除 DPPH、ABTS 自由基能力较强, 对羟自由基清除能力较弱的原因之一。

2.3 对益生菌生长的影响

本研究采用体外单菌培养方法对不同杂粮多糖的益生活性进行分析。不同杂粮多糖对益生菌的增殖具有菌株特异性(图 5)。在多糖浓度为 0.1% 时, 除黑麦、青稞多糖外, 其余 8 种多糖均能作为唯一碳源被长双歧杆菌利用(图 5a); 除黑麦、薏米多糖外, 短双歧杆菌能利用其余 8 种多糖生长增殖(图 5b); 10 种多糖对青春双歧杆菌的促生长作用不明显, 均低于菊糖(图 5c); 而鼠李糖乳杆菌则能利用 10 种多糖作为唯一碳源生长增殖(图 5d)。在多糖浓度为 1% 时, 长双歧杆菌不能利用 10 种多糖, 培养 40 h 后发酵液 $\text{OD}_{600 \text{ nm}}$ 与阴性对照无糖培养基相近(图 5e), 这可能与多糖的浓度具有一定关系, 多糖浓度过高可能导致培养基渗透压增加, 从而导致菌体脱水, 影响益生菌生长^[54-55]; 黄小米和大麦多糖对短双歧杆菌的益生活性高于菊糖, 燕麦多糖与菊糖对短双歧杆菌的益生活性相近(图 5f); 黄小米和大麦多糖对青春双歧杆菌的益生活性高于菊糖, 燕麦多糖与菊糖对青春双歧杆菌的益生活性相近(图 5g); 鼠李糖乳杆菌能利用黄小米、燕麦、糙米和大麦多糖作为唯一碳源生长增殖(图 5h)。本研究结果显示, 浓度为 1% 时, 黄

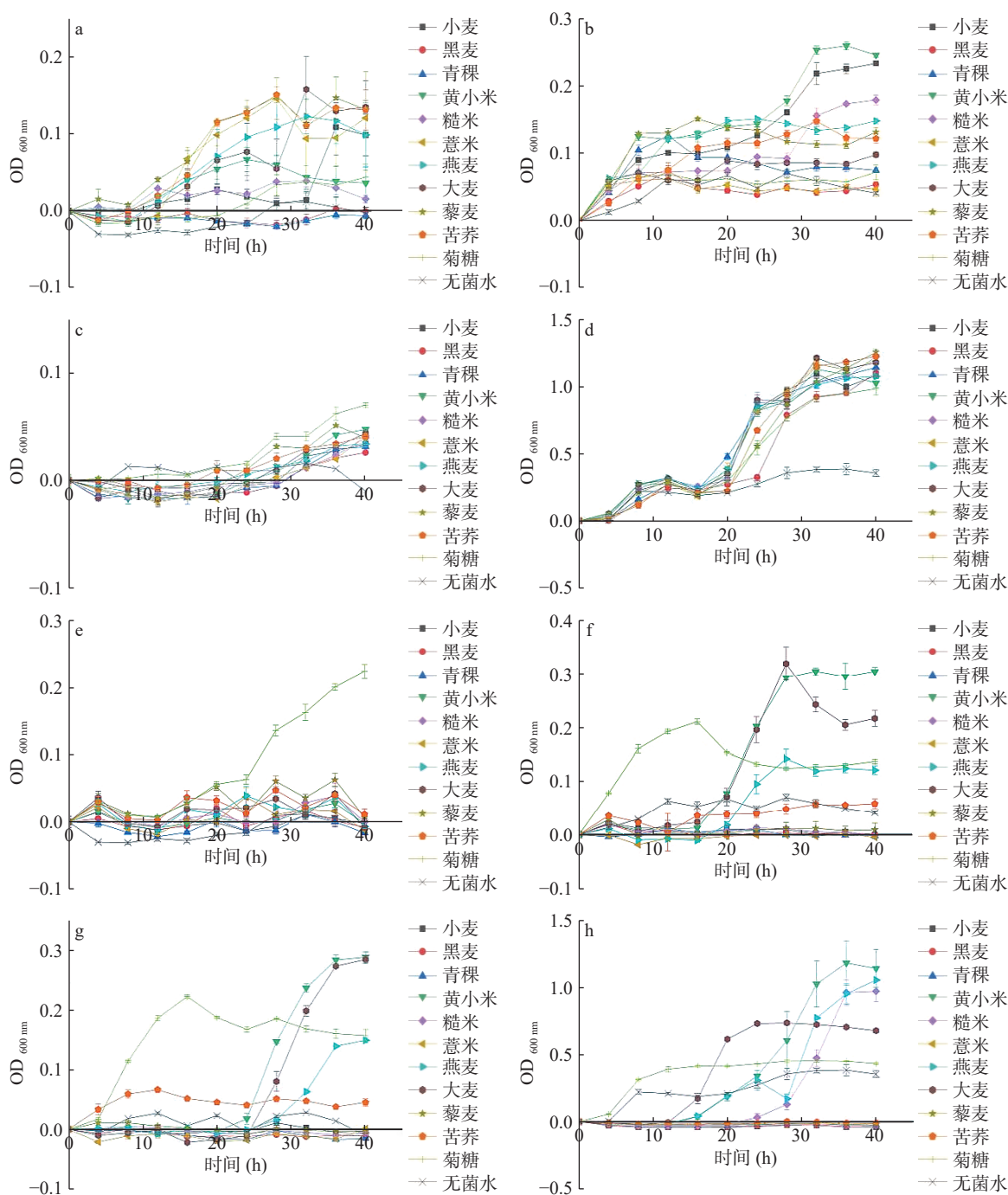


图5 不同杂粮多糖对益生菌生长的影响

Fig.5 The effects of polysaccharides from different coarse cereals on the growth of probiotics

注: 在浓度 0.1% 下不同杂粮多糖对长双歧杆菌(a)、短双歧杆菌(b)、青春双歧杆菌(c)和鼠李糖乳杆菌(d)生长的影响; 在浓度 1% 下不同杂粮多糖对长双歧杆菌(e)、短双歧杆菌(f)、青春双歧杆菌(g)和鼠李糖乳杆菌(h)生长的影响。

小米、大麦、燕麦多糖能够更易被短双歧杆菌、青春双歧杆菌和鼠李糖乳杆菌选择利用, 对照小麦多糖则表现出抑制 4 种益生菌增长的趋势, 同时不同杂粮多糖对益生菌的增殖作用不全是随着浓度增加而增强。据刘丽莎等^[56]报道, 高浓度(添加量大于 2.0%)的白术多糖可能引起渗透压、pH 改变及代谢物的积累等限制了双歧杆菌的生长。同样, 张桂兰等^[57]也发现褐藻硫酸多糖浓度为 2.0%~2.5% 时对双歧杆菌增殖作用最好; 浓度大于 5% 时, 双歧杆菌数量无明显增加。而来源不同的多糖对不同的益生菌作用不

同, 这也可能与其高度复杂的结构、物理特性密切相关^[58], 例如, 水溶性高和黏度低的多糖被认为可以更快、更易被益生菌利用^[59], 因此还有待进一步研究证实。

2.4 体外抑制结肠癌细胞 HCT116 的活性测定

对 10 种多糖进行体外 MTT 增殖抑制试验初筛抗肿瘤活性, 其中小麦、黄小米、糙米、薏米和大麦多糖对 HCT116 细胞有一定抑制作用, 其余 5 种多糖对 HCT116 细胞没有明显抑制作用。根据预实验结果, 选取 5 个浓度梯度, 48、72 h 两个时间梯度, 对具有抑制作用的 5 种多糖进行 MTT 试验, 如图 6、

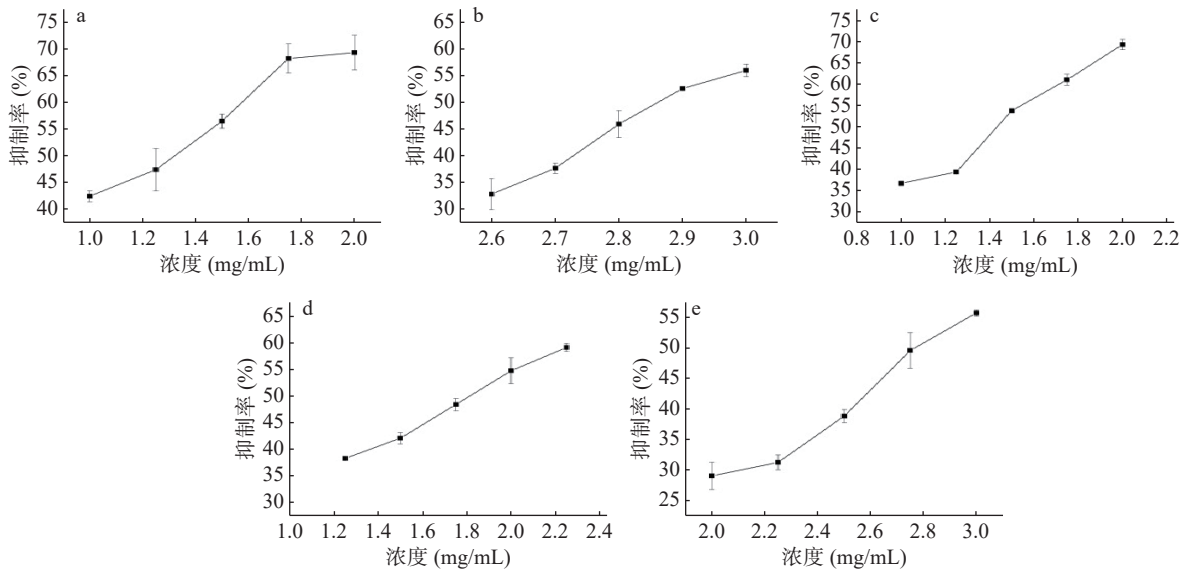


图 6 48 h 下不同浓度小麦(a)、黄小米(b)、糙米(c)、薏米(d)、大麦(e)多糖对 HCT116 细胞的抑制活性
 Fig.6 Inhibitory activity of different concentrations of wheat (a), yellow millet (b), brown rice (c), adlay (d) and barley (e) polysaccharides on HCT116 cells at 48 h

图 7 所示, 利用 SPSS 软件分析计算得出其对 HCT116 细胞的半数致死浓度 IC_{50} , 不同多糖之间 IC_{50} 具有显著差异 ($P < 0.05$), 如图 8 所示。随着对 HCT116 细胞作用时间的延长, 5 种多糖抑制率也相应提高, 表现出时间依赖关系。

在 48 h, 小麦、黄小米、糙米、薏米和大麦多糖的 IC_{50} 值分别为 1.24、2.90、1.40、1.79、2.82 mg/mL。对比 IC_{50} 值大小说明 48 h 下不同多糖抑制 HCT116 细胞增殖的活性强弱: 小麦 > 糙米 > 薏米 > 大麦 > 黄小米。在 72 h, 小麦、黄小米、糙米、薏米和大麦多糖的 IC_{50} 值分别为 0.98、2.55、1.33、1.23、2.82 mg/mL。对比 IC_{50} 值大小说明 72 h 下不同多糖抑制 HCT116 细胞增殖的活性强弱: 小麦 > 薏米 > 糙米 > 黄小米 > 大麦。李彩娇^[8] 曾证明大麦多糖对 HT 29 结肠癌细胞

有抑制作用, 且通过线粒体凋亡途径诱导细胞凋亡, 这与本研究中大麦多糖抑制 HCT116 细胞活性的途径是否一致, 可以作进一步研究。令人意外的是, 48、72 h 下 5 种多糖中对照小麦多糖抗结肠癌细胞活性最强。之前的报道中, Murtazina 等^[60] 已证实通过培养小麦细胞提取获得小麦细胞培养多糖 (wheat cell culture polysaccharides, WCCPSs) 具有抗 HCT 116 结肠癌细胞能力并提出从 WCCPSs 的单糖组成比例来看, 葡萄糖的含量和葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖的比例可能是决定抗癌活性的主要因素。但小麦多糖具体如何表现出较高的抑制 HCT 116 细胞活性的原因和构效关系, 有必要进一步深入探究。综上, 明确多糖结构与抗结肠癌细胞活性的构效关系以及多糖抑制结肠癌细胞增殖机制仍是需要广大研究者们投入

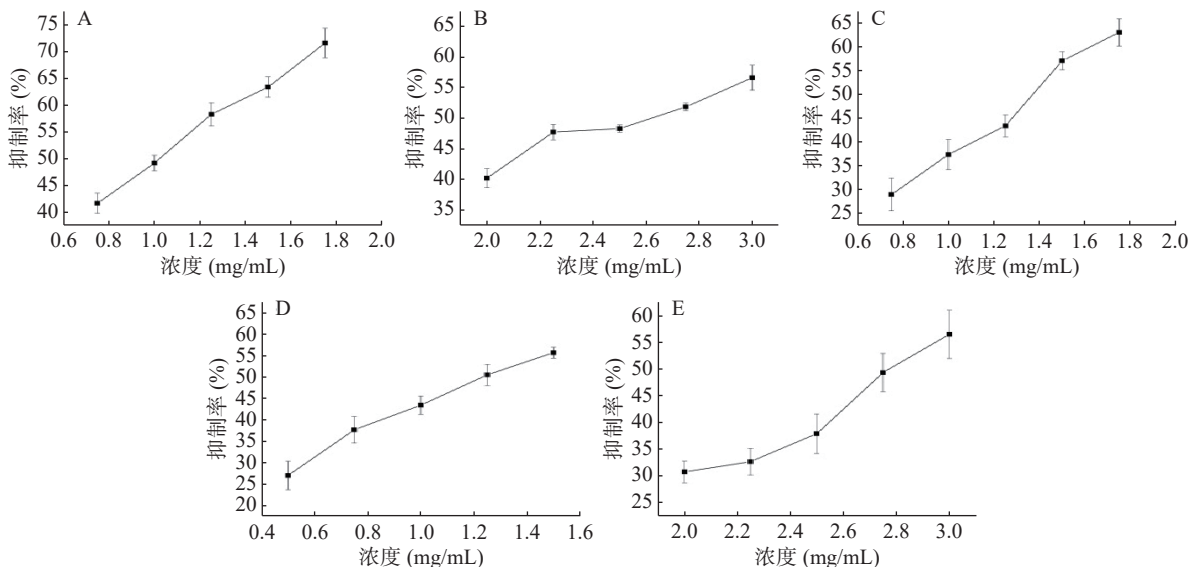


图 7 72 h 下不同浓度小麦(A)、黄小米(B)、糙米(C)、薏米(D)、大麦(E)多糖对 HCT116 细胞的抑制活性
 Fig.7 Inhibitory activity of different concentrations of wheat (A), yellow millet (B), brown rice (C), adlay (D) and barley (E) polysaccharides on HCT116 cells at 72 h

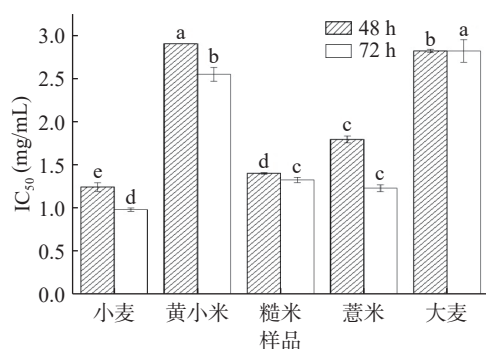


图8 HCT116细胞上不同杂粮多糖的IC₅₀值

Fig.8 IC₅₀ values of polysaccharides from different coarse cereals on the HCT116 cells

研究的关键。

3 结论

本研究以9种杂粮多糖为研究对象,小麦多糖为对照,对比了十种多糖的抗氧化活性、体外抑制结肠癌细胞HCT116的活性和对益生菌生长的影响。结果表明,不同杂粮多糖在三种体外活性上存在显著性差异。十种多糖对DPPH、ABTS和羟自由基均具有清除能力。其中,苦苣多糖对三种自由基的清除能力最强。在对益生菌生长的影响上,1%浓度的黄小米、大麦、燕麦多糖能够更易被短双歧杆菌、青春双歧杆菌和鼠李糖乳杆菌选择利用。在48 h下多糖抑制HCT116细胞增殖的活性强弱:小麦>糙米>薏米>大麦>黄小米,在72 h下多糖抑制HCT116细胞增殖的活性强弱:小麦>薏米>糙米>黄小米>大麦。本研究通过测定比较不同杂粮多糖的三种体外活性,明确不同杂粮多糖在体外活性上的差异,为杂粮多糖的开发提供理论依据,为其在食品、生物等不同领域的精准利用提供思路。

本研究仅对9种谷类杂粮进行了研究,然而杂粮种类丰富,品系庞杂,如何综合评价不同种类杂粮多糖生理活性将是一重大挑战。此外,本研究采用热水浸提法提取不同杂粮中的多糖,而热水浸提得到的大多是分子量较小的中性多糖^[61],如采用酸提法、碱提法、酶解法等不同方法提取,得到的多糖结构不同,其在体外活性上的强弱可能会随结构的改变而产生变化。本文未对各种杂粮多糖进一步的纯化和鉴定,存在一定局限,但也为不同杂粮的活性差异提供重要参考。未来,可对活性较强的杂粮多糖进一步分离纯化,探讨其活性机制。

参考文献

[1] 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. [CAO Y N, XIANG Y, YANG S H, et al. Research progress on nutrition and function of coarse grain sprouts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 433-446.]

[2] YU Z, HAFEEZ M, LIU L, et al. Evaluating the minor coarse cereals product crowdfunding platform through evolutionary game analysis[J]. Sustainability, 2019, 11(5): 1299.

[3] 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.]

[4] BOUIS H E. Enrichment of food staples through plant breeding: A new strategy for fighting micronutrient malnutrition[J]. Nutrition, 2000, 16(7): 701-704.

[5] 杜清,许晓辉,林鹏程,等.植物多糖的研究进展及开发前景[J].转化医学电子杂志,2017,4(4):78-82. [DU Q, XU X H, LIN P C, et al. Research progress and developmental prospect of plant polysaccharide[J]. E-Journal of Translational Medicine, 2017, 4(4): 78-82.]

[6] 宋倩倩.绿豆多糖理化性质、抗氧化活性及其对小鼠肠道健康的影响[D].南昌:南昌大学,2020. [SONG Q Q. Research on physicochemical, antioxidant properties of mung bean polysaccharides and its effects on intestinal health of mice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.]

[7] 吴雅清,许瑞安.降血脂多糖的研究进展[J].中国中药杂志,2018,43(17):3451-3459. [WU Y Q, XU R A. Research advances on hypolipidemic effect of polysaccharides[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(17): 3451-3459.]

[8] 李彩娇.大麦多糖对HT-29细胞的抗癌作用及机制研究[D].天津:天津科技大学,2016. [LI C J. The effect and mechanism of polysaccharides from the barley on the colorectal cancer ht-29 cells[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016.]

[9] 陈培琳,游卿翔,常青,等.植物多糖消化降解特性的研究进展[J].食品工业科技,2019,40(1):299-304,310. [CHEN P L, YOU Q X, CHANG Q, et al. Research progress of digestive and fermentation characteristics of plant polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 299-304,310.]

[10] HU Y, ZHANG J, ZOU L, et al. Chemical characterization, antioxidant, immune-regulating and anticancer activities of a novel bioactive polysaccharide from *Chenopodium quinoa* seeds[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 99: 622-629.

[11] QIAN J Y, BAI Y Y, TANG J, et al. Antioxidation and α -glucosidase inhibitory activities of barley polysaccharides modified with sulfation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(1): 104-111.

[12] SARGAUTIENE V, NAKURTE I, NIKOLAJEVA V. Broad prebiotic potential of non-starch polysaccharides from oats (*Avena sativa* L.): An *in vitro* study[J]. Polish Journal of Microbiology, 2018, 67(3): 307-313.

[13] LIN S, GUO H, LU Min, et al. Correlations of molecular weights of β -glucans from Qingke (Tibetan Hulless Barley) to their multiple bioactivities[J]. Molecules, 2018, 23(7): 1710.

[14] 曾海龙.薏苡仁多糖提取、纯化及流变学特性和抗氧化研究[D].南昌:南昌大学,2011. [ZENG H L. Extraction, purification, rheological property and antioxidant activity of polysaccharides from *Coix lachryma-jobi* L. var. *ma-yuen*[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.]

[15] 王希,吴向阳,仰榴青,等.大麦多糖的提取及清除羟自由基活性研究[J].食品研究与开发,2008,29(11):64-67. [WANG X, WU X Y, YANG L Q, et al. Study on extraction and ability to

- scavenge hydroxyl radicals of polysaccharides from barely[J]. *Food Research and Development*, 2008, 29(11): 64–67.]
- [16] 杨雅蛟, 孔维军, 李先恩, 等. 不同品种山药中多糖及小分子有效成分的含量比较[J]. *食品科技*, 2020, 45(9): 181–187. [YANG Y J, KONG W J, LI X E, et al. Comparison of polysaccharides and small molecule active ingredients in different varieties of yam[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(9): 181–187.]
- [17] YU X, YANG M, DONG J, et al. Comparative analysis of the antioxidant capacities and phenolic compounds of oat and buckwheat vinegars during production processes[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(3): 844–853.
- [18] DAOU C, HUI Z, LAGNIKA C, et al. *In-vitro* fermentation by human fecal bacteria and bile salts binding capacity of physical modified defatted rice bran dietary fiber[J]. *Food & Nutrition Sciences*, 2014, 5(12): 1114–1120.
- [19] 李巨秀, 张小宁, 李伟伟. 不同品种石榴花色苷、总多酚含量及抗氧化活性比较研究[J]. *食品科学*, 2011, 32(23): 143–146. [LI J X, ZHANG X N, LI W W. Comparative studies of total anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activities of different pomegranate varieties[J]. *Food Science*, 2011, 32(23): 143–146.]
- [20] 裴育, 杨胜涛, 冯瑞, 等. 细毛石花菜多糖自由基清除能力和理化性质的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(4): 235–242. [PEI Y, YANG S T, FENG R, et al. Research on the free radical scavenging ability and physicochemical properties of the polysaccharides in *Gelidium crinale*[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(4): 235–242.]
- [21] SALLI K, HIRVONEN J, SIITONEN J, et al. Selective utilization of the human milk oligosaccharides 2'-fucosyllactose, 3-fucosyllactose, and difucosyllactose by various probiotic and pathogenic bacteria[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69: 170–182.
- [22] LI J K, ZHANG X, CAO L Y, et al. Three inulin-type fructans from *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf. roots and their probiotic activity on *Bifidobacterium longum*[J]. *Molecules*, 2018, 23(12): 3123.
- [23] 阚连宝. 高粱乌米多糖提取纯化及对消化系统癌细胞抑制作用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020. [KAN L B. Study on extraction, purification and inhibition for digestive system cancer cells produced by polysaccharides in sorghum silk smut[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.]
- [24] 马莉, 杨敏, 解静, 等. 辣木叶多糖对五种肿瘤细胞的抑制效果[J]. *热带农业科学*, 2020, 40(4): 49–55. [MA L, YANG M, XIE J, et al. Inhibitory effect of polysaccharides from *Moringa oleifera* on the cancer cells of five cancers[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2020, 40(4): 49–55.]
- [25] 周建军, 乐秀芳, 韩家娴, 等. 评价抗癌物质活性的改良 MTT 方法[J]. *中国医药工业杂志*, 1993(10): 455–457. [ZHOU J J, LE X F, HAN J X, et al. Improved mtt assay for activity of anti-tumor agents[J]. *Chinese Journal of Pharmaceuticals*, 1993(10): 455–457.]
- [26] 王希. 大麦多糖的提取及其生物活性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008. [WANG X. Study on extraction of polysaccharides from the barley and their biological activities[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008.]
- [27] VILLAÑO D, FERNÁNDEZ-PACHÓN M S, MOYÁ M L, et al. Radical scavenging ability of polyphenolic compounds towards DPPH free radical[J]. *Talanta*, 2007, 71(1): 230–235.
- [28] MENGOME L E, VOXEUR A, AKUE J P, et al. Screening of antioxidant activities of polysaccharides extracts from endemic plants in Gabon[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2014, 3(2): 77–88.
- [29] 王帅, 赵冬雪, 韩成凤, 等. 6 种活性多糖的结构、性质及其抗氧化活性的比较研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(16): 7–15. [WANG S, ZHAO D X, HAN C F, et al. A comparative study on the structure, properties and antioxidant activity of six active polysaccharides[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(16): 7–15.]
- [30] JI X L, HAN L, LIU F, et al. A mini-review of isolation, chemical properties and bioactivities of polysaccharides from buckwheat (*Fagopyrum Mill.*)[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 127: 204–209.
- [31] 李兰. 小米多糖提取、纯化、结构鉴定及生物活性研究[D]. 太原: 山西大学, 2021. [LI L. Study on extraction, purification, structure identification and biological activity of millet polysaccharide[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.]
- [32] LEE A L, YU Y P, HSIEH J F, et al. Effect of germination on composition profiling and antioxidant activity of the polysaccharide-protein conjugate in black soybean [*Glycine max* (L.) Merr.][J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 113: 601–606.
- [33] WANG J Q, HU S Z, NIE S P, et al. Reviews on mechanisms of *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016: 2016.
- [34] WANG X T, ZHU Z Y, ZHAO L, et al. Structural characterization and inhibition on alpha-D-glucosidase activity of non-starch polysaccharides from *Fagopyrum tartaricum*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 153: 679–685.
- [35] 刘玉婷, 李井雷. 多糖体外抗氧化活性研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 214–219. [LIU Y T, LI J L. Advances in research on antioxidant activity of polysaccharides *in vitro*[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 214–219.]
- [36] 孙元琳, 陕方, 边俊生, 等. 苦荞麦麸碱提多糖的制备与分析[J]. *轻工学报*, 2011, 26(2): 1–4. [SUN Y B, SHAN F, BIAN J S, et al. Preparation and analysis of alkali-soluble polysaccharide from tartary buckwheat bran[J]. *Journal of Light Industry*, 2011, 26(2): 1–4.]
- [37] 庄玮婧. 薏米多糖结构与理化性质的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008. [ZHUANG W J. Study on the structure and physicochemical properties of *Coic lachryma-jobi* polysaccharide[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008.]
- [38] 郑恒光, 沈恒胜, 杨道富, 等. 杏鲍菇菇头多糖的结构鉴定及生物活性评价[J]. *食品科学*, 2019, 40(22): 7–13. [ZHENG H G, SHEN H S, YANG D F, et al. Structural characterization and antitumor activity of crude polysaccharide extracted from the stalk residue of *Pleurotus eryngii*[J]. *Food Science*, 2019, 40(22): 7–13.]
- [39] 邢玉晓. 不同品种青稞的抗氧化活性及抗氧化作用的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017. [XING Y X. Study on the antioxidant activities and antioxidant effects in different varieties of hull-less barley[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.]
- [40] LI J, LIU Y, FAN L, et al. Antioxidant activities of polysac-

- charides from the fruiting bodies of *Zizyphus jujuba* cv. Jinsixiaozao[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 84(1): 390–394.
- [41] HUANG H L, HUANG G L. Extraction, separation, modification, structural characterization, and antioxidant activity of plant polysaccharides[J]. *Chemical Biology & Drug Design*, 2020, 96(5): 1209–1222.
- [42] WANG Y F, LI Y F, LIU Y Y, et al. Extraction, characterization and antioxidant activities of Se-enriched tea polysaccharides[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 77: 76–84.
- [43] REDOUAN E, EMMANUEL P, MICHELLE P, et al. Evaluation of antioxidant capacity of ulvan-like polymer obtained by regioselective oxidation of gellan exopolysaccharide[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 976–983.
- [44] 孙永敢, 胡婕伦, 方卿颖, 等. 苦荞膳食纤维制备及体外降解特性研究[C]. //中国食品科学技术学会第十五届年会. 山东: 中国学术期刊电子出版社, 2018: 359. [SUN Y G, HU J L, FANG Q Y, et al. Preparation and fermentation characteristics of dietary fiber from *Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn[C]. //The 15th Annual Meeting of CIFST. Shandong: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2018: 359.]
- [45] 王轶帆, 邓媛元, 张雁, 等. 龙眼多糖与燕麦多糖的结构特征及其益生活性比较[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(12): 62–71. [WANG Y F, DENG Y Y, ZHANG Y, et al. Comparison of structure characteristics and probiotic activity of longan polysaccharides and oat polysaccharides[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(12): 62–71.]
- [46] HUANG L, HUANG M, SHEN M, et al. Sulfated modification enhanced the antioxidant activity of *Mesona chinensis* Benth polysaccharide and its protective effect on cellular oxidative stress[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 136: 1000–1006.
- [47] ZHANG Q, YU J, ZHANG L, et al. Extraction, characterization, and biological activity of polysaccharides from *Sophora flavescens* Ait[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 93(Pt A): 459–467.
- [48] 于靓, 刘婷婷, 孟冬青, 等. 裙带菜中不同分子质量岩藻多糖的理化成分和抗氧化性比较[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 49(6): 692–697. [YU J, LIU T T, MENG D Q, et al. Comparison of physicochemical constituents and antioxidant properties of fucoidan from different molecular weights of the *Undaria pinnatifida*[J]. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 49(6): 692–697.]
- [49] 李宁, 马绍英, 张允, 等. 响应面法优化苦荞籽中黄酮和多糖的联合提取工艺[J]. *分子植物育种*, 2017, 15(12): 5222–5230. [LI N, MA S Y, ZHANG Y, et al. Optimization of joint extraction process for flavonoids and polysaccharide in Tartary buckwheat seeds by response surface methodology[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(12): 5222–5230.]
- [50] 谭平艳, 郭皖北. 苦荞黄酮的生理功能及其作用机制的研究进展[J]. *医学综述*, 2018, 24(8): 1627–1632. [TAN P Y, GUO W B. Research progress of tartary buckwheat flavonoids on human body's physiological function and mechanism[J]. *Medical Recapitulate*, 2018, 24(8): 1627–1632.]
- [51] 孙元琳, 陕方, 赵立平. 谷物膳食纤维——戊聚糖与肠道菌群调节研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 33(9): 326–330. [SUN Y L, SHAN F, ZHAO L P. Research progress in pentosans as a kind of cereal dietary fiber and their gut microflora modulatory effect[J]. *Food Science*, 2012, 33(9): 326–330.]
- [52] HUMA B U A, FARHAN S, NAZIR A, et al. Functional and health-endorsing properties of wheat and barley cell wall's non-starch polysaccharides[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1463–1480.
- [53] CHEN H, CHEN Z Y, FU Y F, et al. Structure, antioxidant, and hypoglycemic activities of arabinoxylans extracted by multiple methods from triticale[J]. *Antioxidants*, 2019, 8: 584.
- [54] 汪梦雯, 刘文婷, 任雪宁, 等. 茯茶多糖提取工艺优化及其体外抗氧化和对益生菌生长的影响[J]. *陕西科技大学学报*, 2020, 38(1): 50–57. [WANG M W, LIU W T, REN X N, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from Fu Brick tea and its antioxidation *in vitro* and effect on growth of probiotics[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2020, 38(1): 50–57.]
- [55] 黄梅英. 菜籽多糖的提取、分离纯化及其对益生菌的增殖作用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. [HUANG M Y. Study on the extraction, purification and prebiotic activity of rapeseed polysaccharides[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.]
- [56] 刘丽莎, 王锐, 旭日花, 等. 白术多糖对益生菌的促生长作用及结构分析[J]. *食品科学*, 2010, 31(19): 124–128. [LIU L S, WANG R, XU R H, et al. Promoting effect of polysaccharides isolated from *Rhizoma atractylodis* macrocephalae on the growth of probiotics and structure analysis[J]. *Food Science*, 2010, 31(19): 124–128.]
- [57] 张桂兰, 程薇莉, 毕洪玲, 等. 褐藻硫酸多糖促进双歧杆菌增殖的研究[J]. *临床军医杂志*, 2000, 28(2): 24–26. [ZHANG G L, CHENG W L, BI H L, et al. Study on the action of sulfated polysaccharide (SPC) on *Bifidobacterium* proliferation[J]. *Clinical Journal of Medical Officers*, 2000, 28(2): 24–26.]
- [58] 杨斯惠, 向月, 曹亚楠, 等. 植物多糖的益生作用及其影响因素研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(11): 301–310. [YANG S H, XIANG Y, CAO Y N, et al. Progress in research on the prebiotic effects of plant polysaccharides and the factors influencing them[J]. *Food Science*, 2022, 43(11): 301–310.]
- [59] WANG X, HUANG M, YANG F, et al. Rapeseed polysaccharides as prebiotics on growth and acidifying activity of probiotics *in vitro*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 125: 232–240.
- [60] MURTAZINA A, RUIZ ALCALA G, JIMENEZ-MARTINEZ Y, et al. Anti-cancerous potential of polysaccharides derived from wheat cell culture[J]. *Pharmaceutics*, 2022, 14(5): 1100.
- [61] 赵芷芊, 王敏, 张志清. 植物多糖的提取及抗氧化功效的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(13): 337–342. [ZHAO Z Q, WANG M, ZHANG Z Q. Research progress of antioxidation efficacy and extraction of plant polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(13): 337–342.]