

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250107004

引用格式: 李博文, 黄卉妍, 赵明, 等. 黑木耳和玉米须复合降糖饮料配方的优化[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 165–171.

LI BW, HUANG HY, ZHAO M, *et al.* Optimization of the formulation of hypoglycemic compound beverage containing *Auricularia auricula* and *Stigma maydis* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 165–171. (in Chinese with English abstract).

黑木耳和玉米须复合降糖饮料配方的优化

李博文¹, 黄卉妍^{1,2}, 赵 明¹, 毛 雪^{1*}, 孔祥辉^{1*}

(1. 黑龙江省科学院微生物研究所, 哈尔滨 150010; 2. 黑龙江农垦职业学院护理学院, 哈尔滨 150010)

摘 要: 目的 以黑木耳和玉米须为原料, 开发一款适合糖尿病人饮用的复合饮料。**方法** 以黑木耳、玉米须为原料, 黄原胶作为稳定剂, 罗汉果糖苷作为矫味剂, 通过正交试验优化复合饮料的制备工艺, 以体外降糖和抗氧化试验评估饮料的降血糖效果。**结果** 复合饮料的最佳配方为: 黑木耳酶解液添加比例 30%, 玉米须提取液添加比例 40%, 罗汉果糖苷添加量 0.10 g, 黄原胶添加量 0.03 g。此条件下复合饮料的感官评分为 73.57 分。复合饮料 α -葡萄糖苷酶抑制率为 $(55.26 \pm 2.05)\%$, α -淀粉酶抑制率为 $(34.64 \pm 0.40)\%$ 。复合饮料 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率为 $(77.08 \pm 1.20)\%$, 超氧阴离子清除率为 $(30.56 \pm 0.41)\%$, 羟基自由基清除率为 $(38.95 \pm 0.43)\%$, 均优于单一的黑木耳酶解液与玉米须提取液。**结论** 复合饮料在降血糖, 清除体内自由基方面具有积极作用, 本研究确定的黑木耳和玉米须复合饮料配方及制备工艺具有可行性和有效性, 为开发具有降糖和抗氧化功效的功能性饮料提供了理论依据和实践参考。

关键词: 黑木耳; 玉米须; 饮料; 降血糖

Optimization of the formulation of hypoglycemic compound beverage containing *Auricularia auricula* and *Stigma maydis*

LI Bo-Wen¹, HUANG Hui-Yan^{1,2}, ZHAO Ming¹, MAO Xue^{1*}, KONG Xiang-Hui^{1*}

(1. Institute of Microbiology Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150010, China;

2. School of Nursing, Heilongjiang Agricultural Reclamation Vocational College, Harbin 150010, China)

ABSTRACT: Objective To develop a compound beverage suitable for diabetics using *Auricularia auricula* and *Stigma maydis* as raw materials. **Methods** Using *Auricularia auricular* and *Stigma maydis* as raw materials, xanthan gum as a stabilizer, and mogroside as a flavoring agent, the preparation process of the compound beverage was optimized through orthogonal experiments. The hypoglycemic effects of the beverage was evaluated by *in vitro* hypoglycemic and antioxidant tests. **Results** The optimal formula for the compound beverage was as follows: 30% of *Auricularia auricula* enzymatic hydrolysate, 40% of *Stigma maydis* extract, 0.10 g of mogroside, and 0.03 g of xanthan gum. Under these conditions, the sensory score of the compound beverage was 73.57 points. The

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 黑龙江省科学院青年创新基金项目(QNCX2024SW02)

第一作者: 李博文(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: 398867672@qq.com

*通信作者: 毛雪(1990—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: mx45792027@163com

孔祥辉(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为食药菌精深加工。E-mail: kxh29@126.com

α -glucosidase inhibition rate and α -amylase inhibition rate of the composite beverage were $(55.26 \pm 2.05)\%$ and $(34.64 \pm 0.40)\%$, respectively. The 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging rate, superoxide anion scavenging rate, and hydroxyl radical scavenging rate of the compound beverage were $(77.08 \pm 1.20)\%$, $(30.56 \pm 0.41)\%$, and $(38.95 \pm 0.43)\%$, respectively, all superior to those of the single *Auricularia auricula* enzymatic hydrolysate and *Stigma maydis* extract. **Conclusion** The composite beverage demonstrates positive effects in regulating blood glucose levels and eliminating endogenous free radicals. This study establishes the optimized formulation and preparation process for *Auricularia auricula* and *Stigma maydis* compound beverage, which demonstrates both feasibility and effectiveness. These findings provide both a theoretical foundation and practical references for developing functional beverages with dual hypoglycemic and antioxidant properties.

KEY WORDS: *Auricularia auricular*; *Stigma maydis*; beverage; hypoglycemic effect

0 引言

糖尿病作为一种慢性代谢性疾病,治疗周期长、成本高,已成为全球重大公共卫生问题^[1]。根据 2024 年发布的《糖尿病并发症疾病研究白皮书》显示,2023 年我国成人糖尿病患者数达 1.43 亿,发病率高达 12.8%,其中 2 型糖尿病占比超 90%,且近几年糖尿病在我国已呈现出年轻化态势^[2]。常用的降糖药物虽能在短期内控制血糖水平,却难以从根本上控制血糖持久稳定^[3]。长期依赖这类药物进行治疗,机体会出现低血糖、乳酸性酸中毒等多种急性毒副作用和各类慢性并发症^[4-5]。基于此背景,抗糖尿病天然产物的需求正处于快速增长的态势,从天然产物中挖掘具有降血糖作用的活性成分,已然成为科研领域及医疗健康产业共同研究的热点^[6-7]。食用菌的活性成分展现出独特优势,具有多途径、多靶点、多向性、毒副作用小的优点^[8],能够凭借多种机制、多个环节对糖尿病产生作用,所以在糖尿病治疗等方面有着十分广阔的应用前景^[9-11]。

黑木耳是一种药食同源的食用菌,富含黑色素、多糖、蛋白质等物质^[12-13],具有抗肿瘤、降血糖、抗血栓和增强免疫等生物活性^[14]。有研究表明黑木耳子实体多糖能通过多种信号途径刺激胰岛素分泌^[15]、加速糖原合成^[16]和改善糖耐量^[17],从而调节葡萄糖代谢稳态。XIN 等^[18]研究黑木耳多糖(*Auricularia auricula* polysaccharides, AAPs)在血糖调节方面的突出功效,对糖尿病小鼠的降糖具有显著的效果。AAPs 能显著提高抗氧化酶活性和谷胱甘肽水平,提高肝糖原和血浆肽含量^[19]。AAPs 可以部分恢复 stz 诱导的大鼠胰高血糖素样肽-1 分泌损伤,抑制氧化应激通路,从而缓解糖尿病的病情发展^[20]。尹红力等^[21]通过构建体外降血糖模型,评估不同方法制备的 AAPs 体外降血糖能力,结果表明酸性多糖通过影响葡萄糖的转运和代谢酶的活性而达到调节血糖的目的。

玉米须作为极具经济与实用价值的开发食材,含有多种生物学活性成分,在保健及治疗领域应用潜力巨大。玉米须是禾本科、玉蜀黍属植物玉米的花柱和柱头,含有多糖、黄酮类和皂苷类物质等^[22]。玉米须价格低廉、来源广泛且具有降血

糖、降血脂和抗氧化等功效^[23],因此在功能食品中应用广泛。

目前,开发以黑木耳和玉米须为原料的饮料的热度逐年上升,如黑木耳猴头菇乳酸发酵饮料的研究、黑木耳多糖运动饮料生产工艺配方及优化、玉米须水晶梨复合保健饮料的研制^[24-26],而将二者结合起来开发一款饮料的工艺鲜见报道。因此,本研究选用黑木耳、玉米须为原料制成复合饮料,将同功能的两种原料结合在一起充分发挥其降血糖功效,并起到一部分的抗氧化活性,为降血糖产品的开发和原料的综合利用提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑木耳、玉米须(黑龙江省科学院微生物研究所)。

α -葡萄糖苷酶(250 U/g)、对硝基苯基- α -D-吡喃葡萄糖苷(p-nitrophenyl- α -D-glucopyranoside, PNPG, 纯度 99%)、 α -淀粉酶(猪胰腺 50 U/mg)、纤维素酶(50 kU/g)、果胶酶(20000 U/g)、阿卡波糖标准品(纯度 98%)(上海源叶生物科技有限公司);1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(分析纯,美国 Sigma 化学试剂公司);黄原胶(食品级,鄂尔多斯市中轩生化股份有限公司);罗汉果甜苷(食品级,河南中大恒源生物科技股份有限公司);碳酸钠、浓硫酸、苯酚、葡萄糖、盐酸、磷酸缓冲液、邻苯三酚、乙醇(分析纯,北京索莱宝科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

ZQLY-300V 全温振荡培养箱(上海知楚仪器有限公司);Infinite 200 多功能酶标仪[瑞士帝肯(Tecan)公司];R21N 高速冷冻离心机[日本日立(HITACHI)公司];IKA T10 basic 均质机[艾卡仪器设备(广州)有限公司];HVE-50 灭菌锅[舜友(上海)生物技术有限公司];ME204/02 电子天平[精度 0.01 g,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司];DHG-9245 电热恒温鼓风干燥箱(苏州江东精密仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

黑木耳和玉米须复合降糖饮料工艺流程如图 1 所示。

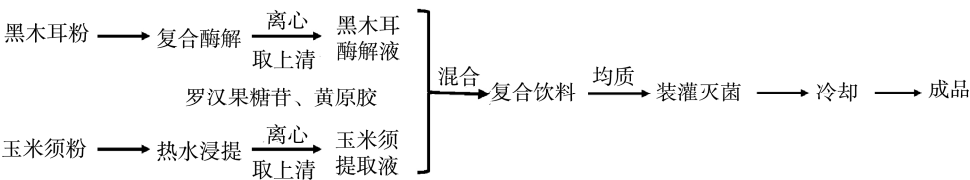


图 1 工艺流程图
Fig.1 Process flow diagram

1.3.2 黑木耳酶解液的制备

以多糖得率和降血糖能力作为评价指标, 将黑木耳与超纯水按 1:60 (g/mL)比例混合, 调节 pH 为 4.5, 按加酶量 20000 U/g 加入纤维素酶, 在 50 ℃条件下酶解 1 h, 灭酶 10 min, 重新调节 pH 为 4.5, 按加酶量 5000 U/g 加入果胶酶在 50 ℃条件下酶解 1 h, 灭酶 10 min, 离心取上清, 得黑木耳酶解液。

1.3.3 玉米须提取液的制备

参考滕蓉^[27]的方法。将玉米须按料液比 1:50 (g/mL) 加入超纯水, 提取温度为 95 ℃, 并恒温浸提 120 min, 纱布过滤, 得到玉米须提取液。

1.3.4 单因素试验

单因素试验采用经典的“一次一因素”法进行考察^[28]。固定配方参数为: 以复合饮料 400 mL 计, 黑木耳酶解液添加量 20% (V:V, 下同), 玉米须提取液添加量 20% (V:V, 下同), 罗汉果糖苷 0.10 g, 黄原胶 0.02 g。选择黑木耳酶解液添加量(10%、20%、30%、40%、50%)、玉米须提取液添加量(10%、20%、30%、40%、50%)、罗汉果糖苷(0.05、0.10、0.15、0.20 g)、黄原胶(0.01、0.02、0.03、0.04 g)作为考察因素, 通过对比不同考察因素对复合饮料感官品质的影响, 确定最佳单因素水平。

1.3.5 正交试验

以黑木耳酶解液添加量(A)、玉米须提取液添加量(B)、罗汉果甜苷(C)、黄原胶(D)为影响因素, 设计 4 因素 3 水平正交试验(表 1), 根据感官评价指标确定饮料最佳配方。

表 1 正交试验因素与水平 Table 1 Factors and levels of orthogonal test				
水平	因素			
	A(黑木耳酶解液添加量)/%	B(玉米须提取液添加量)/%	C(罗汉果糖苷)/g	D(黄原胶)/g
1	20	30	0.05	0.02
2	30	40	0.10	0.03
3	40	50	0.15	0.04

1.3.6 多糖得率测定

配制 1 mg/mL 葡萄糖溶液, 采用硫酸-苯酚法测定样品中的多糖含量。以吸光度为纵坐标(Y), 葡萄糖溶液质量浓度为横坐标(X, mg/mL), 绘制出葡萄糖标准曲线。结果为: 回归方程 $Y=6.381X+0.1312$, $r^2=0.9991$ 。通过标准曲线算出

样品多糖浓度, 并通过下列公式(1)计算出 AAPs 得率。

$$\text{AAPs 得率}/\%=\frac{c \times n \times V}{m \times 1000} \times 100\% \quad (1)$$

式中: c 为被测液总糖的质量浓度, mg/mL; n 为稀释的具体倍数; V 为被测液体的体积, mL; m 为被测样品的质量, g, 1000 为用于单位换算的系数。

1.3.7 感官评价标准

参考闫世芳等^[29]的方法并略有改动, 感官小组由 20 人组成, 采用标准化 100 分制量化评分模式, 评价项目设定为: 组织状态(30 分)、口感(30 分)、滋气味(30 分)、色泽(10 分), 具体评分标准如表 2 所示。

表 2 感官评分标准 Table 2 Sensory evaluation criteria		
项目	分值	评分标准
组织状态(30 分)	21~30	均匀细腻, 无沉淀, 无分层
	10~20	轻微分层, 有明显的颗粒感
	1~9	严重分层, 有大量沉淀
口感(30 分)	21~30	口感爽滑, 不涩口, 无异味
	10~20	口感一般, 较涩口, 有异味
	1~9	口感粗糙, 涩口, 后味较重
滋气味(30 分)	21~30	具有黑木耳、玉米须的香味, 香味自然
	10~20	香味太浓或太淡, 不协调
	1~9	有腥味、糊味
色泽(10 分)	9~10	黄色, 澄清透明, 无浑浊
	5~8	浅褐色, 透明度略差, 有少许浑浊
	1~4	褐色暗淡, 透明度差, 有浑浊

1.3.8 体外降血糖活性测定

(1) α -葡萄糖苷酶抑制率

参考 FAN 等^[30]的方法并略有改动。96 孔板中加入 20 μ L 饮料样品和 40 μ L PNPG, 混合均匀, 37 ℃孵育 10 min, 后加入 10 μ L α -葡萄糖苷酶, 混合均匀, 37 ℃孵育 10 min, 后加入 140 μ L 碳酸钠溶液终止反应, 测 400 nm 波长下吸光值。(以阿卡波糖溶液代替多糖样品为阳性对照组, 以磷酸盐缓冲液代替多糖样品为空白对照, 以磷酸盐缓冲液代替 α -葡萄糖苷酶溶液为背景组), 计算公式(2)如下:

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}/\%=(1-\frac{A_3-A_4}{A_1-A_2}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_1 为空白对照组吸光度; A_2 为空白对照背景组吸光度; A_3 为样品组吸光度; A_4 为样品背景组吸光度。

(2) α -淀粉酶抑制率

参考 LIN 等^[31]的方法并略有改动。将 100 μL 饮料样品与 100 μL α -淀粉酶混合均匀, 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 30 min, 后加入 200 μL 可溶性淀粉, 37 $^{\circ}\text{C}$ 孵育 10 min。取 100 μL 混合溶液加入 400 μL DNS 试剂, 在沸水浴 5 min, 测 540 nm 波长下吸光值。(以阿卡波糖溶液代替多糖样品为阳性对照组, 以磷酸盐缓冲液代替多糖样品为空白对照, 以磷酸盐缓冲液代替 α -淀粉酶为背景组)。计算公式(3)如下:

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}/\% = (1 - \frac{A_7 - A_8}{A_5 - A_6}) \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_5 为空白对照组吸光度; A_6 为空白对照背景组吸光度; A_7 为样品组吸光度; A_8 为样品背景组吸光度。

1.3.9 体外抗氧化活性的测定

(1) DPPH 自由基清除率

参考实验室之前的检测方法^[32], 取 0.5 mL 复合饮料与 0.5 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液 0.5 mL 混合, 避光反应 30 min。在 517 nm 处测其吸光度, 记为 A_b 。对照组以等体积的无水乙醇代替 DPPH 溶液, 测定相应吸光度 A_c 。空白组以无水乙醇代替复合饮料, 测定吸光度 A_a 。计算公式(4)如下。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = (1 - \frac{A_b - A_c}{A_a}) \times 100\% \quad (4)$$

(2) 羟基自由基清除率

取复合饮料 0.5 mL, 分别加入 6 mmol/L 水杨酸乙醇溶液 0.5 mL 以及 6 mmol/L 硫酸亚铁溶液 0.5 mL, 混合均匀, 加入 0.5 mL 的 3% 双氧水溶液, 在 37 $^{\circ}\text{C}$ 温水浴反应 30 min。于 510 nm 处测定样品吸光度, 记为 A_e ; 对照组用去离子水

代替双氧水, 测定相应吸光度 A_f 。空白组用去离子水代替复合饮料, 其吸光度为 A_d 。计算公式(5)如下。

$$\text{羟基自由基清除率}/\% = (1 - \frac{A_e - A_f}{A_d}) \times 100\% \quad (5)$$

(3) 超氧阴离子清除率

先将配制好的 Tris-HCl 缓冲液在 25 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中预热 20 min。取预热后的 Tris-HCl 缓冲液 4.5 mL, 再加入 1.0 mL 复合饮料和 0.4 mL 的 25 mmol/L 邻苯三酚溶液。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 4 min 后, 加入 1.0 mL 的 8% HCl, 于 320 nm 处测定吸光度 A_h 。对照组用去离子水代替邻苯三酚溶液, 测定相应吸光度 A_i 。空白组用去离子水代替复合饮料, 测定吸光度 A_g 。计算公式(6)如下。

$$\text{超氧阴离子清除率}/\% = (1 - \frac{A_h - A_i}{A_g}) \times 100\% \quad (6)$$

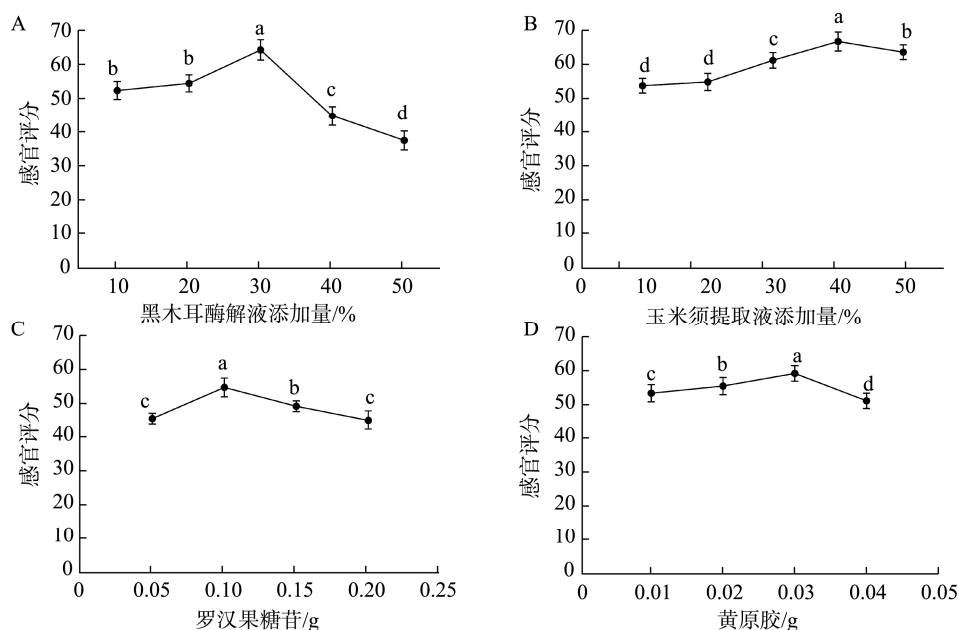
1.4 数据处理

所有试验均重复 3 次, 使用 GraphPad Prism 9.5.1 统计软件进行数据分析及绘图。多组间比较采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 饮料配方优化

不同因素对饮料感官品质的影响结果如图 2 所示。随着黑木耳酶解液的添加量增加, 饮料的感官评分呈现先增大后降低的趋势, 当黑木耳酶解液比例 30% 时, 饮料颜色适宜、味道适中, 也能突出黑木耳特有的风味, 随着黑木



注: 不同字母表示感官评分差异显著($P < 0.05$)。

图 2 黑木耳酶解液添加量(A)、玉米须提取液添加量(B)、罗汉果糖苷(C)、黄原胶(D)对复合饮料感官的影响
Fig.2 Effects of the amount of *Auricularia auricularia* hydrolysate (A), *Stigma maydis* extract (B), mogroside (C) and xanthan gum (D) on the sensory of the compound beverage

耳酶解液添加量的增加, 饮料体系黏稠性增大, 流动性变差, 影响产品的适口性。随着玉米须提取液比例增加, 饮料的感官评分呈现先增大后降低的趋势, 当玉米须提取液比例为 40% 时, 具备玉米的清香, 光泽清亮且没有苦味。这与雷琬琬等^[33]、肖敏等^[34]研究的黑木耳复合饮料结果一致, 原料添加量与产品的口感、色泽有直接关联。

为了改善饮料的口味, 适当添加甜味剂, 随着罗汉果糖苷的增加, 复合饮料中罗汉果味越浓, 口感偏甜, 当添加量为 0.10 g 时, 自然清香, 色泽均匀, 酸甜可口。为了避免黑木耳玉米须复合饮料发生沉淀的现象, 向其中加入稳定剂来增强稳定性。随着黄原胶添加量的增加, 感官评分呈现出先增大后降低的趋势, 当黄原胶添加量为 0.03 g 时, 饮料稳定性良好, 随黄原胶添加量的增加, 饮料体系黏稠性增大, 影响品质。这与秦丹丹等^[35]研制的黑木耳复合饮料选择稳定剂不同, 本试验原料直接采用黑木耳酶解液, 自身具备一定的黏稠性, 不易使用过多增稠剂, 影响产品感官和品质。复合饮料单因素最佳优化配方(以 400 mL 计): 黑木耳酶解液添加量 30% (V:V), 玉米须提取液添加量 40% (V:V), 罗汉果糖苷添加量 0.10 g, 黄原胶添加量 0.03 g。

2.2 正交试验

饮料配方正交试验结果如表 3 所示。按照极差大小, 影响复合饮料感官评价的因素顺序为: $A>C>D>B$, 即黑木耳酶解液添加量、罗汉果糖苷添加量、黄原胶添加量和玉米须提取液添加比例对复合饮料感官评价的影响依次减小; 从正交试验分析结果可知, 复合饮料最优因素组合为 $A_2B_2C_2D_2$, 即复合饮料最佳配方为(以 400 mL 计): 黑木耳酶解液添加比例为 30% (V:V), 玉米须提取液添加比例为 40% (V:V), 罗汉果糖苷添加量为 0.10 g, 黄原胶添加量为 0.03 g, 在此条件下做 3 组平行验证实验, 复合饮料感官评分均值为 73.57 分。

表 3 饮料配方的正交试验					
Table 3 Orthogonal test of beverage formulations					
试验号	A(黑木耳酶解液添加量)/%	B(玉米须提取液添加量)/%	C(罗汉果糖苷)/g	D(黄原胶)/g	感官评价
1	1	1	1	1	49.90
2	1	2	2	2	70.70
3	1	3	3	3	54.00
4	2	1	2	3	67.15
5	2	2	3	1	71.15
6	2	3	1	2	67.90
7	3	1	3	2	49.70
8	3	2	1	3	43.65
9	3	3	2	1	54.35
k_1	58.200	55.583	53.817	58.467	
k_2	68.733	61.833	64.067	62.767	
k_3	49.233	58.750	58.283	54.933	
极差	19.50	6.25	10.25	7.83	

2.3 体外降血糖活性评价

体外降血糖活性评价结果如图 3 所示, 复合饮料对 α -葡萄糖苷酶抑制率为 $(55.26\pm2.05)\%$ 、 α -淀粉酶抑制率为 $(34.64\pm0.40)\%$ 。复合饮料对 α -葡萄糖苷酶、 α -淀粉酶抑制率显著优于黑木耳酶解液与玉米须提取液($P<0.01$)。曹雅菲等^[36]和陈玥彤等^[37]研究都证实了黑木耳具有良好的降血糖效果, 而玉米须的降糖能力是其重要的生理活性, 通过两种原料结合, 表现出了协同增效的结果, 黑木耳富含膳食纤维, 能延缓碳水化合物吸收, 调节肠道微生物菌群, 改善糖代谢; 玉米须含有黄酮类、多糖等多种活性成分, 可促进胰岛素分泌、增强细胞对葡萄糖的摄取利用。二者结合时, 不同成分间相互协同, 可能激活了更多与血糖调节相关的细胞信号通路, 比单一成分作用途径更广^[38]。

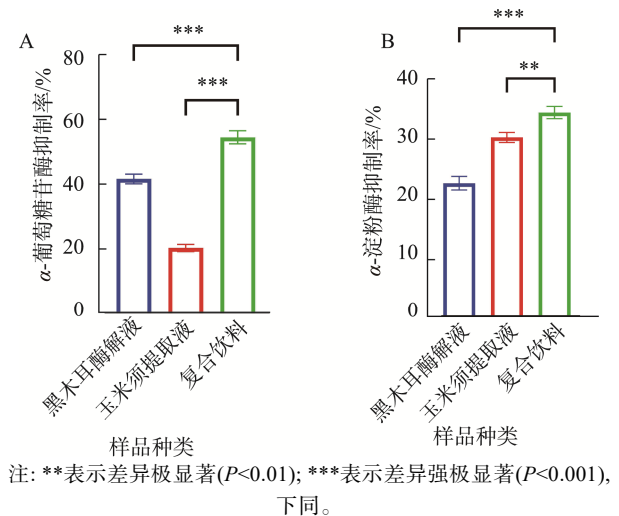


图 3 黑木耳酶解液、玉米须提取液、复合饮料对 α -葡萄糖苷酶 (A) 和 α -淀粉酶的抑制率 (B)

Fig.3 Inhibition rates of *Auricularia auricula* enzymatic hydrolysate, *Stigma maydis* extract and compound beverages on α -glucosidase (A) and α -amylase (B)

2.4 体外抗氧化活性评价

从图 4A 所示, 黑木耳酶解液的 DPPH 自由基清除率为 $(52.21\pm1.39)\%$, 玉米须提取液的 DPPH 自由基清除率为 $(16.02\pm0.93)\%$, 而黑木耳和玉米须复合饮料的 DPPH 自由基清除率为 $(77.08\pm1.20)\%$ 。这表明复合饮料在清除 DPPH 自由基方面具有显著优势, 可能是由于黑木耳和玉米须中的抗氧化成分在复合后产生了协同作用。如图 4B 所示, 黑木耳酶解液的超氧阴离子清除率为 $(9.67\pm0.26)\%$, 玉米须提取液的超氧阴离子清除率为 $(21.57\pm1.15)\%$, 复合饮料的超氧阴离子清除率为 $(30.56\pm0.41)\%$ 。复合饮料在清除超氧阴离子方面同样表现出优于单一原料饮料的特性。根据图 4C 所示, 黑木耳酶解液的羟基自由基清除率为 $(33.48\pm0.39)\%$, 玉米须提取液的羟基自由基清除率为 $(10.57\pm0.39)\%$, 复合饮料的羟基自由基清除率为 $(38.95\pm0.43)\%$ 。这再次证明了复合饮料在抗氧化方面的优势。

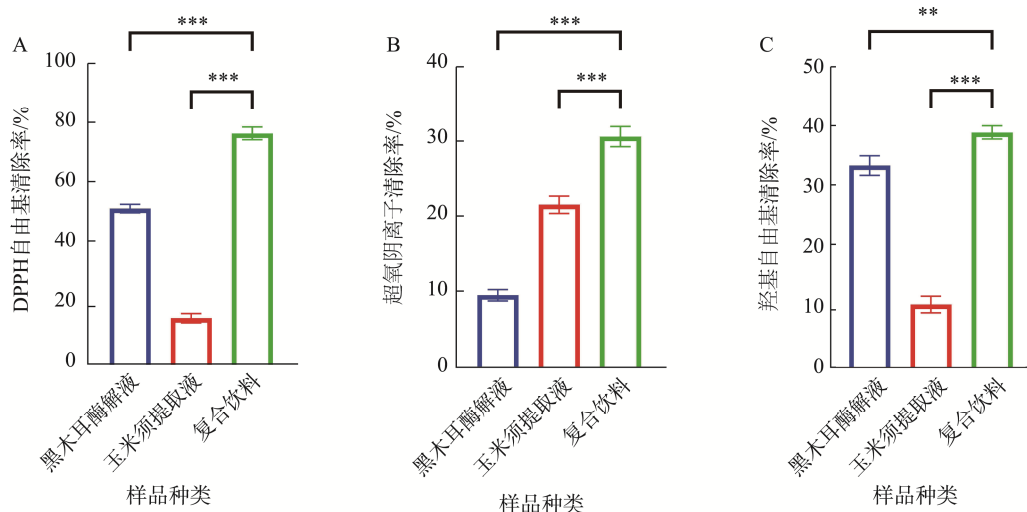


图4 黑木耳酶解液、玉米须提取液、复合饮料的抗氧化活性

Fig.4 Antioxidant activities of *Auricularia auricula* enzymatic hydrolysate, *Stigma maydis* extract and compound beverages

3 结论

通过单因素与正交试验得到复合饮料的最佳配方为:黑木耳酶解液添加量 30%、玉米须提取液添加量 40%、罗汉果糖苷添加量 0.10 g、黄原胶添加量 0.03 g。此配方下饮料口感与风味俱佳;体外降血糖活性和体外抗氧化活性测定显示,复合饮料对 α -葡萄糖苷酶抑制率为 $(55.26 \pm 2.05)\%$ 、 α -淀粉酶抑制率为 $(34.64 \pm 0.40)\%$,显著优于单一的黑木耳酶解液与玉米须提取液,表明其具备良好的降血糖潜能;体外抗氧化活性测定表明,复合饮料的 DPPH 自由基清除率为 $(77.08 \pm 1.20)\%$ 、超氧阴离子清除率为 $(30.56 \pm 0.41)\%$ 、羟基自由基清除率为 $(38.95 \pm 0.43)\%$,均优于单一原料饮料,表明复合饮料抗氧化优势明显。

玉米须和黑木耳均为药食同源原料,均被证实含有显著的降血糖和抗氧化活性成分,对二者复合降糖饮料配方进行研究,能开发出天然、副作用小的辅助降糖饮品,为糖尿病患者提供温和的血糖控制辅助手段,满足特殊人群需求,提高其生活质量。黑木耳和玉米须复合饮料的开发提高这两种天然资源的利用效率,减少浪费,通过优化配方,可以最大化这些活性成分的效果,从而开发出具有更好降糖效果和更高营养价值的饮料产品。综上所述,本研究成功研制出一种具有优良口感且具有降血糖、抗氧化能力的黑木耳和玉米须复合饮料,具有一定的市场开发潜力。

参考文献

- OGURTSOVA K, GUARIGUATA L, BARENGO NC, *et al.* IDF diabetes atlas: Global estimates of undiagnosed diabetes in adults for 2021 [J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2022, 183: 109–118.
- DARENSKAYA MA, KOLESNIKOVA LI, KOLESNIKOV SI. Oxidative stress: Pathogenetic role in diabetes mellitus and its complications and therapeutic approaches to correction [J]. Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 2021, 171(2): 179–189.
- ZHENG Q, JIA RB, OU ZR, *et al.* Comparative study on the structural characterization and α -glucosidase inhibitory activity of polysaccharide fractions extracted from *Sargassum fusiforme* at different pH conditions [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 194: 602–610.
- 顾今, 杨开, 叶帮伟, 等. 食(药)用菌抗糖尿病研究进展[J]. 中国食用菌, 2010, 29(1): 7–10.
- GU J, YANG K, YE BW, *et al.* Research progress on anti-diabetic effects of edible (medicinal) fungi [J]. Edible Fungi of China, 2010, 29(1): 7–10.
- LYU F, XU X, ZHANG L. Natural polysaccharides with different conformations: Extraction, structure and anti-tumor activity [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2020, 8(42): 9652–9667.
- GONG T, LIU S, WANG H, *et al.* Supercritical CO₂ fluid extraction, physicochemical properties, antioxidant activities and hypoglycemic activity of polysaccharides derived from fallen Ginkgo leaves [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101–153.
- ZHAO Y, YAN B, WANG Z, *et al.* Natural polysaccharides with immunomodulatory activities [J]. Mini-Reviews in Medicinal Chemistry, 2020, 20(2): 96–106.
- 谢明勇. 天然产物多糖结构与功能研究: 基于大粒车前子多糖和黑灵芝多糖的深入解析[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- XIE MY. Research on the structure and function of natural product polysaccharides: In-depth analysis based on the polysaccharides of *Plantago asiatica* L. seeds and *Ganoderma atrum* [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- DOS JM, SANTOS, TEWARI S, *et al.* The role of oxidative stress in the development of diabetes mellitus and its complications [J]. Journal of Diabetes Research, 2019: 4189813. DOI: 10.1155/2019/4189813
- ZHENG Y, BAI L, ZHOU Y, *et al.* Polysaccharides from Chinese herbal medicine for anti-diabetes recent advances [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 121: 1240–1253.
- QIU A, WANG Y, ZHANG G, *et al.* Natural polysaccharide-based nanodrug delivery systems for treatment of diabetes [J]. Polymers (Basel), 2022, 14(15): 3217.
- 刘楠楠. 黑木耳多糖的提取纯化、结构表征及降糖活性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- LIU NN. Study on extraction, purification, structural characterization and hypoglycemic activity of *Auricularia auricula-judae* polysaccharides [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2022.
- 李娜, 吕爽, 董建国, 等. 常见食用菌营养成分及风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 441–448.

- LI N, LV S, DONG JG, *et al.* Analysis of nutritional components and flavor substances of common edible fungi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 441–448.
- [14] LIU EC, JI Y, ZHANG F, *et al.* Review on *Auricularia auricula-judae* as a functional food: Growth, chemical composition, and biological activities [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69: 1739–1750.
- [15] 骆嘉原, 孙凯峰, 包怡红, 等. 黑木耳多糖的酶法生物转化工艺优化及其体外降血糖性能[J]. 食品工业科技, 2019, 40(21): 203–230.
- LUO JY, SUN KF, BAO YH, *et al.* Optimization of the enzymatic biotransformation process of *Auricularia auricula* polysaccharides and their *in vitro* hypoglycemic properties [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(21): 203–230.
- [16] MA F, WU J, LI P, *et al.* Effect of solution plasma process with hydrogen peroxide on the degradation of water-soluble polysaccharide from *Auricularia auricula*. II: Solution conformation and antioxidant activities *in vitro* [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 575–580.
- [17] HUAN X, DONG XS, CHUN C. Hypoglycemic polysaccharides from *Auricularia auricula* and *Auricularia polytricha* inhibit oxidative stress, NF- κ B signaling and proinflammatory cytokine production in streptozotocin-induced diabetic mice-science direct [J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(1): 87–93.
- [18] XIN YH, CHUN GL, XUE W, *et al.* Hypoglycemic and anti-diabetic nephritis activities of polysaccharides separated from *Auricularia auricula* in diet-streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2019, 13: 352–358.
- [19] NANNAN L, XUE FC, JUANNA S, *et al.* Hypoglycemic effects of *Auricularia auricula* polysaccharides on high fat diet and streptozotocin-induced diabetic mice using metabolomics analysis [J]. Food and Function, 2021, 12: 9994.
- [20] 徐瑶瑶. 黑木耳多糖体外水解物制备工艺的优化及其抗氧化与降血糖活性研究[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- XU YY. The study on antioxidant activity and antidiabetic activity of polysaccharide hydrolysate from *Auricularia auricula* [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2018.
- [21] 尹红力, 赵鑫, 佟丽丽, 等. 黑木耳多糖体外和体内降血糖功能[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 221–226.
- YIN HL, ZHAO X, TONG LL, *et al.* Hypoglycemic function of *Auricularia auricula-judae* polysaccharides *in vitro* and *in vivo* [J]. Food Science, 2015, 36(21): 221–226.
- [22] 何子涵, 吴星霖, 向志宇, 等. 玉米须生物活性成分、功效与提取方法的研究进展[J]. 北方农业学报, 2023, 51(4): 96–104.
- HE ZH, WU XL, XIANG ZY, *et al.* Research progress on bioactive components, efficacy and extraction methods of corn silk [J]. Journal of Northern Agriculture, 2023, 51(4): 96–104.
- [23] 闫书博, 冯聪慧, 张原宾, 等. 玉米须功能性成分及药理价值研究进展[J]. 食品工程, 2023(3): 7–9, 21.
- YAN SB, FENG CH, ZHANG YB, *et al.* Research progress on functional components and pharmacological values of corn silk [J]. Food Engineering, 2023(3): 7–9, 21.
- [24] 陈香利, 吴秦柔, 毛雪, 等. 黑木耳猴头菇乳酸发酵饮料的配方及工艺研究[J]. 中国食物与营养, 2024, 30(10): 16–19.
- CHEN XL, WU QR, MAO X, *et al.* Study on the formula and process of lactic acid fermented beverage of *Auricularia auricula* and *Hericium erinaceus* [J]. China Food and Nutrition, 2024, 30(10): 16–19.
- [25] 赵晓岩, 葛江丽. 黑木耳多糖运动饮料生产工艺配方及优化[J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(6): 125–128.
- ZHAO XY, GE JL. Production process formulation and optimization of *Auricularia Auricula* polysaccharide sports beverage [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(6): 125–128.
- [26] 张文丽, 程振伟. 玉米须水晶梨复合保健饮料的研制[J]. 食品工程, 2023(3): 18–21.
- ZHANG WL, CHENG ZW. Development of *Stigma maydis* crystal pear compound health beverage [J]. Food Engineering, 2023(3): 18–21.
- [27] 滕蓉. 玉米须玫瑰茄复合保健饮料的研制[J]. 山东化工, 2021, 50(20): 36–37, 40.
- TENG R. Development of compound health drink with corn silk and hibiscus sabdariffa [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(20): 36–37, 40.
- [28] CHIANG CF, LAI LS. Effect of enzyme-assisted extraction on the physicochemical properties of mucilage from the fronds of *Asplenium australasicum* (J. Sm.) hook [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 346–353.
- [29] 闫世芳, 鲍玉花, 肖明, 等. 黑枸杞玫瑰复合饮料的研制及其品质和抗氧化活性评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2972–2980.
- YAN SF, BAO YH, XIAO M, *et al.* Development of *Lycium ruthenicum* Murr. and *R. Setate*×*R. Rugosa* compound beverage and evaluation of its quality and antioxidant activity [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(9): 2972–2980.
- [30] FAN M, SUN X, QIAN Y, *et al.* Effects of metal ions in tea polysaccharides on their *in vitro* antioxidant activity and hypoglycemic activity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 113: 418–426.
- [31] LIN S, GUO H, LU M, *et al.* Correlations of molecular weights of β -glucans from Qingke (*Tibetan hulless Barley*) to their multiple bioactivities [J]. Molecules, 2018, 23(7): 1710.
- [32] 毛雪, 殷博, 张欣, 等. 破壁灵芝孢子粉多糖抗氧化活性及稳定性研究[J]. 中国农学通报, 2024, 40(35): 130–137.
- MAO X, YIN B, ZHANG X, *et al.* Study on antioxidant activity and stability of polysaccharides from broken-wall *Ganoderma lucidum* spores [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(35): 130–137.
- [33] 雷琬琬, 吴秀宁, 徐芳琴, 等. 黑木耳复合饮料的制备及其抗氧化性研究[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(15): 119–125.
- LEI WW, WU XN, XU FQ, *et al.* Preparation of *Auricularia auricula* compound beverage and its antioxidant activity [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(15): 119–125.
- [34] 肖敏, 丁燕, 魏彦梅. 正交试验法优化火龙果黑木耳复合饮料配方的研究[J]. 湖南农业科学, 2022(10): 61–65.
- XIAO M, DING Y, WEI YM. An optimization on the compound beverage of pitaya fruit and black fungus by orthogonal test [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022(10): 61–65.
- [35] 秦丹丹, 曹慧馨, 白洋, 等. 黑木耳黑枸杞复合饮料研制及其体外抗氧化性[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(3): 108–116.
- QIN DD, CAO HX, BAI Y, *et al.* Study on preparation of *Auricularia auricular* and *Lycium ruthenicum* Murr. compound beverage and its antioxidant activity [J]. Food Research and Development, 2020, 41(3): 108–116.
- [36] 曹雅菲, 刘君星, 刘玉荣, 等. 黑木耳多糖对2型糖尿病大鼠血糖、体重及肾脏功能的影响[J]. 黑龙江医药科学, 2020, 43(5): 5–7.
- CAO YF, LIU JX, LIU YR, *et al.* Effects of auricularia polysaccharide on blood glucose, body weight and kidney function in type 2 diabetic rats [J]. Heilongjiang Medicine and Pharmacy, 2020, 43(5): 5–7.
- [37] 陈羽彤, 张闪闪, 李文意, 等. 黑木耳多糖的磷酸化修饰、结构表征及体外降糖活性[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 29–35.
- CHEN YT, ZHANG SS, LI WY, *et al.* Structural characterization and hypoglycemic effect *in vitro* of phosphorylated *Auricularia auriculata* polysaccharide [J]. Food Science, 2022, 43(8): 29–35.
- [38] 黄雅晨. 复方降糖饮的研制及其降血糖功效评价[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- HUANG YC. The development of compound hypound hypoglycemic beverage and its evaluation on hypoglycemic effects [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)