冯盼盼, 方颂平, 刘贝, 等. 黄水多糖醇沉工艺优化及其体外抗氧化、降血糖活性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 254−263. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090304

FENG Panpan, FANG Songping, LIU Bei, et al. Optimization of the *Huangshui* Polysaccharide Ethanol Precipitation Process and Its Antioxidant and Hypoglycemic Activities *in Vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 254−263. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090304

· 工艺技术 ·

黄水多糖醇沉工艺优化及其体外抗氧化、降血糖活性分析

冯盼盼[1,2], 方颂平[1,3,*], 刘　贝[1,2], 余　越[1,3], 马婉露[1,3], 刘　露[1,3], 邱腾辉[1], 张传博[1]

（1.亳州学院生物与食品工程系, 安徽亳州 236800;
2.药用植物有效成分生物合成亳州市重点实验室, 安徽亳州 236800;
3.安徽省功能型配制酒开发与应用工程研究中心, 安徽亳州 236800）

摘　要: 为促进白酒酿造副产物黄水的高值化利用，本研究以黄水为原料，以黄水粗多糖（crude *Huangshui* polysaccharide，cHSP）得率为评价指标，结合单因素实验和响应面法优化 cHSP 的醇沉工艺。在此基础上，采用酶法脱蛋白制备黄水多糖（*Huangshui* polysaccharide，HSP），并评价其体外抗氧化及降血糖活性，进一步通过酶动力学分析 HSP 对 *α*-淀粉酶的抑制机制。结果表明，cHSP 的最佳醇沉工艺为：温度 5.8 ℃、时间 14.3 h、乙醇体积比 1∶5，在此条件下 cHSP 得率为 7.36±0.03 mg/mL。体外活性研究表明，HSP 对 $ABTS^{+}$、DPPH 及羟基自由基的清除能力较强，其 IC_{50} 值分别为 3.38、1.53 和 3.36 mg/mL；同时，HSP 对 *α*-葡萄糖苷酶、胰淀粉酶和 *α*-淀粉酶的 IC_{50} 值分别为 3.75、2.40 和 2.08 mg/mL，表明其具有潜在的降血糖功效。酶动力学分析表明：HSP 对 *α*-淀粉酶的抑制类型为混合型抑制，抑制常数（K_I）为 4.21 mg/mL，低于酶-底物复合物抑制常数（K_{IS}=8.62 mg/mL），说明 HSP 对游离酶的结合能力更强。本研究结果表明，黄水多糖具有一定的抗氧化活性和较好的 *α*-淀粉酶抑制能力，在天然抗氧化剂和降血糖功能食品开发中具有潜在的应用价值。

关键词: 黄水, 多糖, 响应面优化, 抗氧化, 降血糖, 酶动力学

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0254−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090304　　本文网刊:

Optimization of the *Huangshui* Polysaccharide Ethanol Precipitation Process and Its Antioxidant and Hypoglycemic Activities *in Vitro*

FENG Panpan[1,2], FANG Songping[1,3,*], LIU Bei[1,2], YU Yue[1,3], MA Wanlu[1,3], LIU Lu[1,3], QIU Tenghui[1], ZHANG Chuanbo[1]

（1.Department of Biology and Food Engineering, Bozhou University, Bozhou 236800, China;
2.Bozhou Key Laboratory of Biosynthesis of Effective Components of Medicinal Plants, Bozhou 236800, China;
3.Anhui Engineering Research Center for Development and Application of Functional Blended Liquor, Bozhou 236800, China）

Abstract: To promote the high-value utilization of *Huangshui*, a byproduct of Baijiu brewing, *Huangshui* was used as the raw material, and the yield of crude *Huangshui* polysaccharide (cHSP) was used as the evaluation index. The isolation process of cHSP was optimized using single-factor experiments combined with response surface methods. Subsequently, enzymatic deproteinization was employed to prepare *Huangshui* polysaccharide (HSP), followed by *in vitro* evaluation of antioxidant and hypoglycemic activities. Furthermore, the inhibition mechanism of HSP on *α*-amylase was analyzed using

收稿日期: 2025−09−26

基金项目: 安徽省功能型配制酒开发与应用工程研究中心开放课题（GNPZJ202502）; 安徽省高校自然科学重点项目（2023AH052280）; 2025 年安徽省大学生创新训练计划项目（S202512926027）; 安徽省服务十大新兴产业项目（2023sdxx105）。

作者简介: 冯盼盼（1991−）, 女, 硕士, 助教, 研究方向: 天然产物开发与利用, E-mail: 2022110008@bzuu.edu.cn。

*** 通信作者:** 方颂平（1972−）, 男, 本科, 副教授, 研究方向: 传统白酒酿造, E-mail: fsphs@163.com。

enzyme kinetics. The results showed that the optimal ethanol precipitation conditions for cHSP were as follows: temperature of 5.8 ℃, time of 14.3 h, and ethanol volume ratio of 1∶5. Under these conditions, the cHSP was 7.36± 0.03 mg/mL. Activity studies *in vitro* indicated that HSP exhibited strong scavenging capacity against $ABTS^+$, DPPH, and hydroxyl radicals, with IC_{50} values of 3.38, 1.53, and 3.36 mg/mL, respectively. Meanwhile, the IC_{50} values of HSP against *α*-glucosidase, pancreatic amylase, and *α*-amylase were 3.75, 2.40, and 2.08 mg/mL, respectively, indicating a potential hypoglycemic effect. Enzyme kinetic analysis showed that the inhibitory effect of HSP on *α*-amylase was mixed. The inhibition constant (K_I) was 4.21 mg/mL, which was lower than the inhibition constant for the enzyme-substrate complex (K_{IS}=8.62 mg/mL). This results suggest that HSP has a stronger affinity for free *α*-amylase. The findings indicate that *Huangshui* polysaccharide have certain antioxidant activity and excellent *α*-amylase inhibitory capacity, highlighting their potential applications in the development of natural antioxidants and functional foods for hypoglycemia.

Key words: *Huangshui*; polysaccharide; response surface optimization; antioxidant; hypoglycemic; enzyme kinetics

黄水（又称黄浆水）是我国传统白酒酿造过程中产生的一种特有副产物，主要由发酵浆水、代谢产物以及微生物菌体沉积于窖池底部形成的一种棕黄色、黏稠液体[1]。研究表明，黄水中含有丰富的乙醇、酸类、醇类、酯类等挥发性成分，以及糖类、氨基酸、腐殖质、酵母自溶物等营养物质[2−3]。黄水产量较大，据统计，每生产 1 t 固态法白酒会产生 0.3~0.4 t 黄水，其资源化利用已成为白酒行业关注的焦点之一[4−5]。目前，黄水的资源化利用方式主要有串蒸回收风味成分、有机酸提取、生产调味酒[6]、制备酯化液[7−8]、培养人工老窖[9] 以及生产单细胞蛋白[10] 等，然而上述方式普遍存在资源化利用率低、附加值不高等问题。

多糖是一类具有多种生物活性的天然大分子，具有抗炎、免疫调节、调节肠道微生菌群等多种生理功效[11−13]，且因其具有低细胞毒性和安全性而受到广泛关注[14]。近年来研究发现，黄水中不仅含有风味成分，还含有丰富的肽类、多糖等功能性成分[4]。廖勤俭等[15] 从黄水中筛选出具有潜在的血管紧张素转换酶（angiotensin-converting enzyme, ACE）抑制肽。此外，对黄水多糖也有相关研究报道，裴文豪等[16] 对五粮液白酒酿造过程产生的黄水多糖进行研究，发现其具有被肠道微生物降解利用的潜在益生活性；Li 等[17] 研究发现，黄水多糖对肠道菌群及代谢产物具有调节作用；Huo 等[18−19] 发现黄水多糖具有显著的免疫调节特性及肠道屏障保护作用。然而，当前对黄水多糖的研究主要集中在免疫调节及益生活性等方面，而对其高效醇沉分离工艺及抗氧化、降血糖生物活性仍有待深入研究。

本研究以浓香型白酒酿造副产物黄水为研究对象，以黄水粗多糖 cHSP 得率为评价指标，通过单因素实验结合响应面法优化 cHSP 的醇沉工艺，并对其除杂精制以制备 HSP。在此基础上，系统评价 HSP 的体外抗氧化能力及其对 *α*-葡萄糖苷酶、胰淀粉酶和 *α*-淀粉酶的抑制活性，研究其潜在的降血糖功能。研究结果可为黄水多糖的高效提取及高值化利用提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

黄水　取自白酒酿造教学基地浓香型白酒酿造窖池；考马斯亮蓝、牛血清白蛋白（BSA）、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、L-抗坏血酸（V_C）、咔唑、半乳糖醛酸、水杨酸　上海麦克林生化科技股份有限公司；透析袋（MD55, 8000~14000 Da）、总抗氧化能力（T-AOC）检测试剂盒、*α*-葡萄糖苷酶（25 U/mg）、对硝基苯基-*α*-D-吡喃葡萄糖苷（PNPG）　上海源叶生物科技有限公司；酸性蛋白酶（1.5×10^5 U/mL）、木瓜蛋白酶（6.0×10^5 U/g）　宁夏夏盛实业集团有限公司；*α*-淀粉酶（30 U/mg）　合肥博美生物科技有限公司；胰淀粉酶（25 U/mg）　伊势久（江苏连云港）生物科技有限责任公司；阿卡波糖　上海阿拉丁生化科技有限公司。

3100 型酶标仪　上海闪谱生物科技有限公司；LGJ-10C 冷冻干燥机　四环科仪科技发展河北有限责任公司；UV-6100 紫外可见分光光度计　上海元析仪器有限公司；H1850R 冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；RE-2000A 旋转蒸发仪　上海亚荣生化仪器厂。

1.2　实验方法

1.2.1　样品预处理　参考 Wang 等[20] 的方法，略作修改。取一定量黄水用纱布过滤，滤液于 4 ℃ 静置 24 h，以 6000 r/min 离心 15 min，收集上清液。使用旋转蒸发仪将上清液浓缩至原体积的 1/3，按与黄水浓缩液 1∶1000 的体积比加入酸性蛋白酶[21]，45 ℃ 酶解 3 h 后，沸水浴 10 min 灭酶处理，冷却后 6000 r/min 离心 15 min，取上清液备用。

1.2.2　cHSP 醇沉工艺　参考 Wang 等[20] 的方法，略作修改。准确量取预处理后的黄水浓缩液 50 mL，在一定温度下加入无水乙醇，充分混匀后，静置一定时间，6000 r/min 离心 20 min，收集沉淀物；用 80%（v/v）乙醇洗涤沉淀物 3 次，自然挥发去除乙醇，用少量去离子水溶解沉淀物，冷冻干燥后得 cHSP。cHSP 得率按公式（1）计算。

$$W(mg/mL) = \frac{m}{150} \qquad 式（1）$$

式中：W 为 cHSP 的得率，mg/mL；m 为 cHSP 的质量，mg；150 为浓缩前的黄水体积。

1.2.3　单因素实验　参考沈赤[22] 的方法，结合前期

预实验结果,将乙醇体积比(预处理后的黄水浓缩液体积:无水乙醇体积)1∶5、醇沉温度 6 ℃、醇沉时间 13 h 作为基本反应条件,以 cHSP 得率为评价指标,选择醇沉温度(3、6、9、12、15 ℃)、醇沉时间(7、10、13、16、19 h)、乙醇体积比(1∶2、1∶3、1∶4、1∶5、1∶6)进行单因素实验。

1.2.4 响应面优化试验 在单因素实验的基础上,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中 Box-Behnken 模型设计三因素三水平试验,因素和水平见表 1。

表 1 响应面试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experimental design

水平	因素		
	A醇沉温度(℃)	B醇沉时间(h)	C乙醇体积比(v/v)
−1	3	10	1∶4
0	6	13	1∶5
1	9	16	1∶6

1.2.5 cHSP 的精制及组分分析 参考曹建昌等[23]方法,并稍作修改。称取条件优化后提取的 cHSP 100 mg,溶于 10 mL 去离子水中,加入 0.1 mL 600 U/mL 的木瓜蛋白酶溶液[24],55 ℃ 酶解 3 h 后,沸水浴 10 min 灭酶处理,冷却后 6000 r/min 离心 15 min,收集上清液转入截留分子量为 8000~14000 Da 的透析袋中,去离子水透析 48 h,每隔 6 h 更换一次去离子水。透析结束后,将透析袋内溶液旋蒸浓缩至 10 mL,加无水乙醇 50 mL 混匀,4 ℃ 静置 14.0 h 后,6000 r/min 离心 20 min 以收集沉淀物,用 80%(v/v)乙醇洗涤沉淀物 3 次,自然挥发去除乙醇,并用少量去离子水溶解,冷冻干燥得黄水多糖 HSP。

HSP 中总糖含量的测定参考 Chen 等[25]方法,以葡萄糖为标准品建立标准曲线方程 y=12.761x−0.0122(R^2=0.998);蛋白质含量的测定参考唐敏等[26]方法,以牛血清白蛋白为标准品建立标准曲线方程 y=5.3543x−0.0125(R^2=0.992);糖醛酸含量的测定参考 Zhao 等[27]方法,以半乳糖醛酸为标准品建立标准曲线方程 y=10.633x−0.0083(R^2=0.993);多酚含量的测定参考 Molole 等[28]方法,以没食子酸为标准品建立标准曲线方程 y=0.01255x+5.54881(R^2=0.998)。

1.2.6 HSP 的体外抗氧化活性分析

1.2.6.1 $ABTS^+$自由基清除能力测定 取 HSP 溶液(浓度分别为 0.5、1.0、2.5、5.0、10.0、20.0 mg/mL)7 μL 与 ABTS 工作液 280 μL 均匀混合,于室温下避光反应 6 min,用酶标仪测定 734 nm 处吸光值。以 V_C 为阳性对照。按公式(2)计算 $ABTS^+$自由基清除率。

$$ABTS^+自由基清除率(\%)=\frac{A_0-A_1}{A_0}\times 100 \quad 式(2)$$

式中:A_0 表示去离子水与 ABTS 工作液组的吸光度值;A_1 表示样品与 ABTS 工作液组的吸光度值。

1.2.6.2 DPPH 自由基清除能力测定 参考任蕊蕊等[29]的方法并稍作修改。取 HSP 溶液(浓度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mg/mL)100 μL 与 0.2 mol/L 的 DPPH 溶液 100 μL 均匀混合,于室温下避光反应 30 min,用酶标仪测定 517 nm 处吸光值。以 V_C 为阳性对照。按公式(3)计算 DPPH 自由基清除率。

$$DPPH自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100$$

式(3)

式中:A_1 表示样品溶液与 DPPH 溶液混合后所测的吸光度值;A_2 表示样品溶液与无水乙醇混合后所测的吸光度值;A_0 表示去离子水与 DPPH 溶液混合后所测的吸光度值。

1.2.6.3 羟基自由基清除能力测定 取 HSP 溶液(浓度分别为 0.5、1.0、2.5、5.0、10.0、20.0 mg/mL)2 mL,依次与 9 mmol/L 的 $FeSO_4$ 溶液 2 mL、8.8 mmol/L 的过氧化氢溶液 2 mL、9 mmol/L 的水杨酸溶液 2 mL 均匀混合,37 ℃ 反应 30 min,测定 510 nm 处吸光值。以 V_C 为阳性对照。按公式(4)计算羟基自由基清除率。

$$羟基自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100$$

式(4)

式中:A_1 表示样品溶液、$FeSO_4$ 溶液、过氧化氢溶液及水杨酸溶液混合后所测的吸光度值;A_2 表示去离子水代替过氧化氢溶液所测的吸光度值;A_0 表示去离子水代替样品溶液所测的吸光度值。

1.2.7 HSP 的体外降血糖活性分析

1.2.7.1 α-葡萄糖苷酶抑制活性测定 参考林杉等[30]的方法并稍作修改。利用 pH6.8、0.1 mol/L 的 PBS 缓冲液分别配制不同浓度的 HSP 溶液、1 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶溶液及 8 mmol/L 的 PNPG 溶液。取 HSP 溶液(浓度分别为 1.0、2.0、5.0、10.0、20.0 mg/mL)50 μL 与 α-葡萄糖苷酶溶液 70 μL 混合均匀,37 ℃ 孵育 10 min,再加入 PNPG 溶液 50 μL 振荡混匀,37 ℃ 反应 30 min,最后加入 1 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液 50 μL 终止反应,用酶标仪测定 405 nm 处吸光值。以阿卡波糖为阳性对照。α-葡萄糖苷酶抑制率按公式(5)计算。

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0-A_3}\right)\times 100$$

式(5)

式中:A_1 表示上述样品组所测的吸光度值;A_2 表示缓冲液代替 α-葡萄糖苷酶所测的吸光度值;A_0 表示缓冲液代替样品所测的吸光度值;A_3 表示缓冲液分别代替样品和 α-葡萄糖苷酶所测的吸光度值。

1.2.7.2 α-淀粉酶抑制活性测定 参照李志鹏等[31]

的方法并稍作修改。取 HSP 溶液(浓度分别为 0.5、1.0、2.5、5.0、10.0 mg/mL)100 μL 与 2 U/mL 的 α-淀粉酶溶液 100 μL、pH 6.8 的 PBS 缓冲液 100 μL 混合均匀，37 ℃ 孵育 10 min，再加入 10 mg/mL 的淀粉溶液 200 μL 并振荡混匀，37 ℃ 反应 15 min，最后加入 DNS 试剂 500 μL 并沸水浴 15 min，冷却至室温后，测定 540 nm 处吸光值。以阿卡波糖为阳性对照。按公式(6)计算 α-淀粉酶抑制率。

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0-A_3}\right)\times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中：A_1 表示上述样品组所测的吸光度值；A_2 表示缓冲液代替 α-淀粉酶所测的吸光度值；A_0 表示缓冲液代替样品所测的吸光度值；A_3 表示缓冲液分别代替样品和 α-淀粉酶所测的吸光度值。

1.2.7.3　胰淀粉酶抑制活性测定　HSP 对胰淀粉酶抑制率的测定参照 1.2.7.2 进行，胰淀粉酶代替 α-淀粉酶，所用胰淀粉酶为 4 U/mL。

1.2.8　HSP 对 α-淀粉酶抑制的可逆性分析　参照 1.2.7.2 方法，固定底物可溶性淀粉浓度为 15.0 mg/mL、α-淀粉酶为 2.0 U/mL。在 1000 μL 反应体系中，分别加入 100 μL 不同浓度的 HSP 溶液(0、2.5、5.0、10.0 mg/mL)，在不同加酶量(25、50、75、100 μL)条件下，测定 540 nm 处的吸光值，记为 A_1；以缓冲液代替 α-淀粉酶溶液的吸光度值，记为 A_2。按公式(7)计算不同 HSP 浓度、不同加酶量条件下的反应速率，作酶反应速率与加酶量的关系曲线图。

$$\text{反应速率}(\Delta A/\text{min})=\frac{A_1-A_2}{T} \quad \text{式（7）}$$

式中：A_1、A_2 表示上述加样后所测的吸光度值；T 表示反应时间，min。

1.2.9　HSP 对 α-淀粉酶的抑制类型分析及动力学常数计算　参照 Dhital 等[32] 的方法，稍作修改。固定 α-淀粉酶加酶量为 100 μL，取 100 μL 不同浓度 HSP 溶液(0、2.5、5.0、10.0、20.0 mg/mL)作为抑制剂，按照公式(7)测定不同淀粉浓度(1.0、2.0、5.0、10.0 mg/mL)条件下的酶促反应速率。以底物浓度的倒数(1/[S])为横坐标，以反应速率的倒数(1/V)为纵坐标，绘制 Lineweaver-Burk 双倒数曲线图。以 Lineweaver-Burk 双倒数曲线图中各曲线的斜率和纵轴截距分别对 HSP 浓度进行二次作图，利用式(8)、式(9)分别计算抑制常数 K_I 及酶-底物络合物抑制常数 K_{IS}。

$$\text{斜率}=\frac{K_m}{V_{max}}+\frac{K_m}{V_{max}}\cdot\frac{1}{K_I}\cdot[I] \quad \text{式（8）}$$

$$\text{Y轴截距}=\frac{1}{V_{max}}+\frac{1}{V_{max}}\cdot\frac{1}{K_{IS}}\cdot[I] \quad \text{式（9）}$$

式中：V_{max} 表示最大反应速率，ΔA/min；K_m 表示米氏常数，mg/mL；[I] 表示抑制剂浓度，mg/mL；K_I 表示抑制常数，mg/mL；K_{IS} 表示酶-底物络合物抑制常数，mg/mL。

1.3　数据处理

所有实验均重复 3 次，使用 OriginPro 2021 软件作图，采用 Design-Expert 8.0.6 软件进行响应面试验设计及分析，采用 SPSS Statistics 27 软件进行不同处理组间的显著性分析，$P<0.05$ 为差异显著性水平。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

由图 1(A)可知，cHSP 得率随醇沉温度的升高呈先上升后下降趋势，在 6 ℃ 时最高，为 7.34±0.1 mg/mL，显著高于 3 ℃ 和 9 ℃ 处理组($P<0.05$)。此后随着醇沉温度进一步升高，cHSP 得率逐渐降低，这可能是由于高温增加了 cHSP 在醇-水体系中的溶解性，导致其析出量减少[33]。因此选择 6 ℃ 为较适宜的醇沉温度。

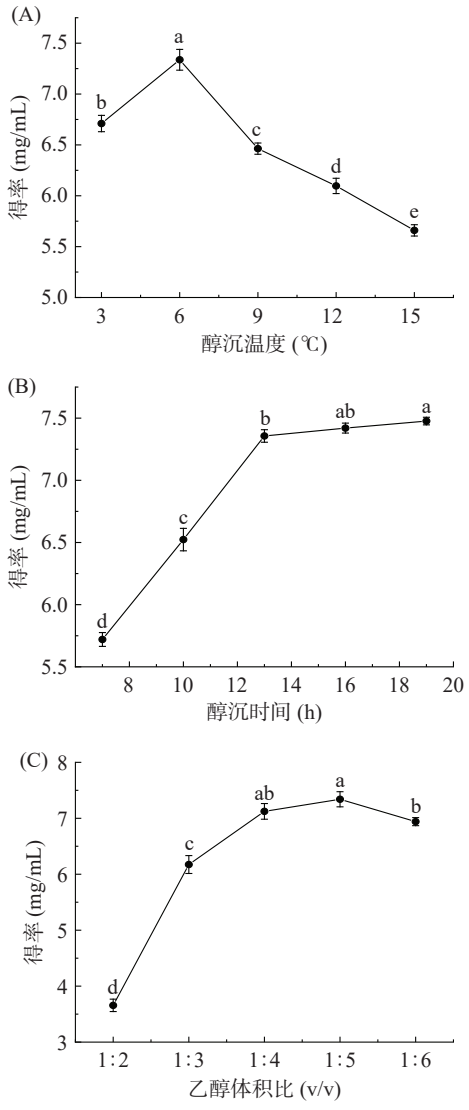


图 1　醇沉温度(A)、醇沉时间(B)和乙醇体积比(C)对 cHSP 得率的影响

Fig.1　Effects of precipitation temperature (A), precipitation time (B) and ethanol volume ratio (C) on the yield of cHSP

注：不同字母(a~e)表示同一物质不同浓度的处理组间具有显著性差异($P<0.05$)。

由图 1(B)可知，cHSP 得率随醇沉时间的延长

呈逐渐上升趋势。在 7~13 h 范围内, cHSP 得率随醇沉时间延长持续增加, 13 h 后得率增加趋于平缓, 与 16 h 处理组相比无显著差异(P>0.05), 说明此时多糖沉淀已基本完成; 继续增加醇沉时间可能会导致多糖通过非特异性吸附结合色素、蛋白质等杂质, 影响多糖纯度[34]。因此, 选择 13 h 为较适宜的醇沉时间。

由图 1(C)可知, cHSP 得率随着乙醇体积比的增加亦呈先升高后降低趋势, 在 1∶5 时最高, 达 7.34±0.14 mg/mL, 显著高于 1∶6 处理组(P<0.05)。该结果与陈玉鹏等[35] 报道的枸杞果渣粗多糖提取工艺中最佳醇沉酒精度(80%vol)基本一致。这可能是由于随着乙醇体积比增加, 混合溶剂的介电常数下降, 多糖溶解度降低, 有利于沉淀析出; 但过高的乙醇体积比会增大体系总体积, 导致多糖浓度降低, 反而使醇沉效率降低[36]。

2.2 响应面试验结果

2.2.1 试验设计与结果 使用 Box-Behnken 模型对醇沉温度(A)、醇沉时间(B)、乙醇体积比(C)进行三因素三水平试验设计, 结果如表 2 所示。

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface experiments

实验号	A醇沉温度 (℃)	B醇沉时间 (h)	C乙醇体积比 (v/v)	cHSP得率 (mg/mL)
1	3.00	10.00	1∶5	6.42
2	9.00	10.00	1∶5	6.26
3	3.00	16.00	1∶5	7.03
4	9.00	16.00	1∶5	6.93
5	3.00	13.00	1∶4	6.84
6	9.00	13.00	1∶4	6.79
7	3.00	13.00	1∶6	6.98
8	9.00	13.00	1∶6	6.83
9	6.00	10.00	1∶4	6.52
10	6.00	16.00	1∶4	7.12
11	6.00	10.00	1∶6	6.52
12	6.00	16.00	1∶6	7.18
13	6.00	13.00	1∶5	7.33
14	6.00	13.00	1∶5	7.42
15	6.00	13.00	1∶5	7.38
16	6.00	13.00	1∶5	7.31
17	6.00	13.00	1∶5	7.35

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 2 的响应面试验结果进行多元二次多项式回归拟合, 得到 cHSP 得率与醇沉温度(A)、醇沉时间(B)、乙醇体积比(C)的线性回归方程模型为 $Y=7.36-0.057A+0.32B+0.030C+0.015AB-0.025AC+0.015BC-0.34A^2-0.36B^2-0.16C^2$。

对表 2 中的数据进行方差分析, 结果如表 3 所示。该模型的 F 值为 166.87, P<0.0001, 表明模型极显著; 失拟项 F 值为 0.41, P 值为 0.7551>0.05, 失拟不显著, 表明所建立的回归模型拟合度良好。决定系数 R^2=0.9954, 校正系数 R_{Adj}^2=0.9894, 说明该模型的相关度和精确度高, 有 98.94% 的响应值变化可用于 cHSP 得率的分析[37]。模型中一次项 A、B 及二次项 A^2、B^2、C^2 对 cHSP 得率影响极显著(P<0.01), AB、AC、BC 之间的交互作用对 cHSP 得率影响不显著(P>0.05), 由 F 值可知, 各因素对 cHSP 得率的影响程度为 B(醇沉时间)>A(醇沉温度)>C(乙醇体积比)。

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance for regression models

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	2.1	9	0.23	166.87	<0.0001	**
A	0.026	1	0.026	18.93	0.0034	**
B	0.81	1	0.81	577.21	<0.0001	**
C	0.0072	1	0.0072	5.15	0.0575	
AB	0.0009	1	0.0009	0.64	0.4486	
AC	0.0025	1	0.0025	1.79	0.2228	
BC	0.0009	1	0.0009	0.64	0.4486	
A^2	0.48	1	0.48	341.24	< 0.0001	**
B^2	0.55	1	0.55	393.83	< 0.0001	**
C^2	0.11	1	0.11	78.6	< 0.0001	**
残差	0.00983	7	0.0014			
失拟项	0.0023	3	0.0008	0.41	0.7551	
纯误差	0.0075	4	0.0019			
总差	2.11	16				
R^2	0.9954					
R^2_{Adj}	0.9894					

注: *P<0.05, 表示差异显著; **P<0.01, 表示差异极显著。

2.2.2 验证试验 利用 Design-Expert 8.0.6 预测 cHSP 的最佳分离工艺为: 醇沉温度 5.76 ℃, 醇沉时间 14.32 h, 乙醇体积比 1∶5.12, 该条件下 cHSP 得率预测值为 7.43 mg/mL。考虑操作的简便及实际应用, 将分离条件调整为: 醇沉温度 5.8 ℃, 醇沉时间 14.3 h, 乙醇体积比 1∶5, 在此条件下重复 3 次实验, cHSP 实际得率为 7.36±0.03 mg/mL, 与预测值接近, 明显高于文献 [38] 利用醇沉法提取 cHSP 的得率(4.1 mg/mL)。

2.3 HSP 的组成成分

经测定, HSP 中总糖含量为 87.14%±1.06%, 蛋白质含量为 6.38%±0.58%, 糖醛酸含量为 4.03%±0.73%, 稍低于白酒丢糟中的糖醛酸含量(5.12%±0.34%)[39], 这可能与其浸出程度及黄水的酸性环境引起的糖醛酸及其多糖链的溶解度下降有关。此外, HSP 中还含有 3.63%±0.21% 的多酚, 这可能与多酚和多糖相似的溶解特性及两者之间的分子间相互作用引发的共沉淀有关[40]。

2.4 HSP 的体外抗氧化活性分析

由图 2(A)可知, 在实验浓度范围内, HSP 对 $ABTS^+$自由基的清除能力随浓度升高而增强, IC_{50} 值为 3.38 mg/mL。在质量浓度达到 20 mg/mL 时, HSP 处理组的 $ABTS^+$自由基清除率显著低于相同浓度的 Vc 处理组(P<0.05), 表明 HSP 具有一定的

ABTS$^+$自由基清除活性，但弱于 V_C 组。

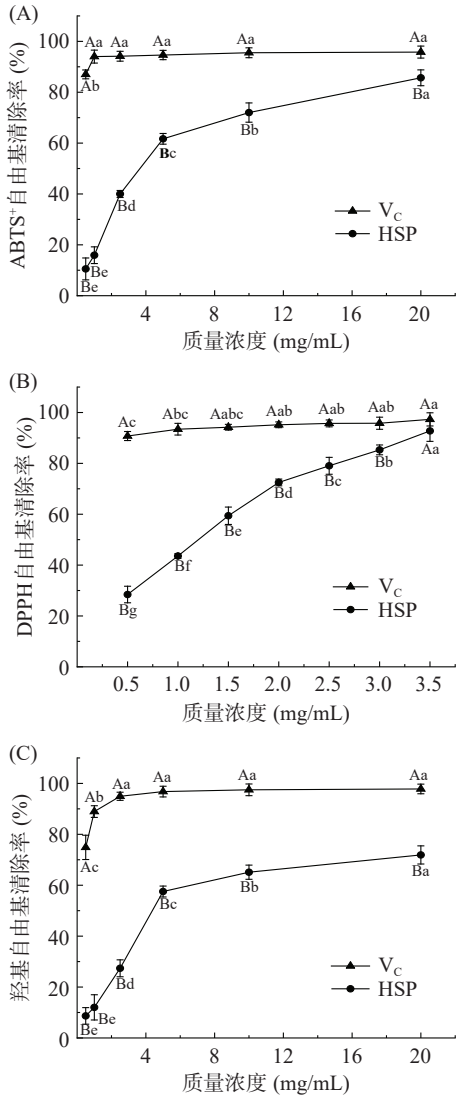


图 2　HSP 对 ABTS$^+$(A)、DPPH(B)及羟基自由基(C)的清除率

Fig.2　Scavenging efficiency of HSP on ABTS$^+$ (A), DPPH (B), and hydroxyl radical (C)

注：不同小写字母(a~e)表示同一物质不同浓度的处理组间具有显著性差异(P<0.05)，不同大写字母(A~B)表示同一浓度不同物质的处理组间具有显著性差异(P<0.05)；图 3 同。

由图 2(B)可知，在浓度范围为 0.5~3.5 mg/mL 时，HSP 对 DPPH 自由基的清除率随浓度升高而增强，IC_{50} 值为 1.53 mg/mL。当 HSP 质量浓度为 3.5 mg/mL 时，其对 DPPH 自由基的清除率达 92.76%±4.11%，与同浓度 V_C 组相比无显著差异(P>0.05)，远高于文献 [38] 报道的 4.1 mg/mL 黄水粗多糖的 DPPH 自由基清除率(18.1%)，说明 HSP 具有较好的 DPPH 自由基清除活性。

由图 2(C)可知，HSP 对羟基自由基的清除能力亦表现出浓度依赖性，IC_{50} 值为 3.36 mg/mL。在 0.5~5 mg/mL 浓度范围内，HSP 的羟基自由基清除率增速较快，但当浓度超过 5 mg/mL 后，其增速趋缓，推测可能与 HSP 分子聚集形成的空间位阻有关[41]。在浓度为 20 mg/mL 时，HSP 的羟基自由基清除率为 71.9%±3.56%，低于 Xu 等[42] 报道的 3 mg/mL cHSP 的羟基自由基清除率(接近 80%)，且显著低于同浓度的 V_C 处理组(P<0.05)，表明 HSP 具备一定的羟基自由基清除能力，但整体较弱。

在浓香型白酒酿造过程中，黄水与酒糟在固态发酵阶段长期共存，因此二者所含多糖成分在来源及结构上具有一定相似性。黎莲等[39] 研究表明，白酒丢糟多糖在浓度为 2 mg/mL 时，对 DPPH、ABTS$^+$及羟基自由基的清除率分别为 29.16%±0.01%、19.99%±0.01% 和 31.63%±0.01%，该结果与本研究中黄水多糖在相同浓度下的抗氧化趋势基本一致。多糖的抗氧化性能不仅取决于其结构特征，还与其所结合的生物活性成分有关。颜金鑫等[43] 从高粱皮中提取的阿拉伯木聚糖表现出较高的 ABTS$^+$及 DPPH 自由基清除能力，分析其抗氧化能力与阿拉伯木聚糖及其结合的花青素有关。浓香型白酒以高粱为主要酿酒原料，在固态发酵过程中，高粱皮中的阿拉伯木聚糖可部分溶出并进入黄水，因此黄水多糖的抗氧化活性，与其可能含有结构与功能类似的阿拉伯木聚糖有关。

2.5　HSP 的体外降血糖活性分析

由图 3(A)可知，在实验浓度范围(1~20 mg/mL)内，HSP 的质量浓度与 α-葡萄糖苷酶抑制活性呈正相关。当 HSP 浓度为 5 mg/mL 时，其对 α-葡萄糖苷酶的抑制率为 48.29%±3.12%，当浓度增至 20 mg/mL 时，抑制率达到 70.98%±0.83%。经计算，HSP 对 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 值为 3.75 mg/mL，表明其具有一定的 α-葡萄糖苷酶抑制活性。

由图 3(B)可知，在实验浓度范围(0.5~10 mg/mL)内，HSP 对 α-淀粉酶的抑制效果呈浓度依赖性，IC_{50} 值为 2.08 mg/mL。当 HSP 浓度为 10 mg/mL 时，其对 α-淀粉酶的抑制率为 88.5%±1.17%，与同浓度阿卡波糖处理组相比无显著差异(P>0.05)，表明其具有较强的 α-淀粉酶抑制活性。

由图 3(C)可知，HSP 对胰淀粉酶活性的抑制能力与 α-淀粉酶相似，IC_{50} 值为 2.40 mg/mL。当 HSP 浓度为 10 mg/mL 时，其对胰淀粉酶的抑制率达 88.67%±3.14%，与同浓度阿卡波糖处理组相比无显著差异(P>0.05)，说明其具有较强的胰淀粉酶抑制活性。

餐后高血糖是 2 型糖尿病发病的主要因素之一，抑制 α-淀粉酶、α-葡萄糖苷酶活性可以延迟葡萄糖在肠道中的吸收，从而降低餐后血糖水平[44−45]。本研究结果显示，HSP 对 α-葡萄糖苷酶、胰淀粉酶和 α-淀粉酶均有抑制作用，这一活性可能与黄水中富含源于酿酒酵母细胞壁的水溶性 β-葡聚糖有关。研究表明，酵母源 β-葡聚糖具有调节糖代谢相关酶活性的潜力，李赛芬等[46] 研究表明，从酿酒酵母细胞壁中提取的水溶性酵母 β-葡聚糖对 α-淀粉酶、α-葡萄糖苷酶具有抑制作用，在质量浓度为 5.0 mg/mL 时，

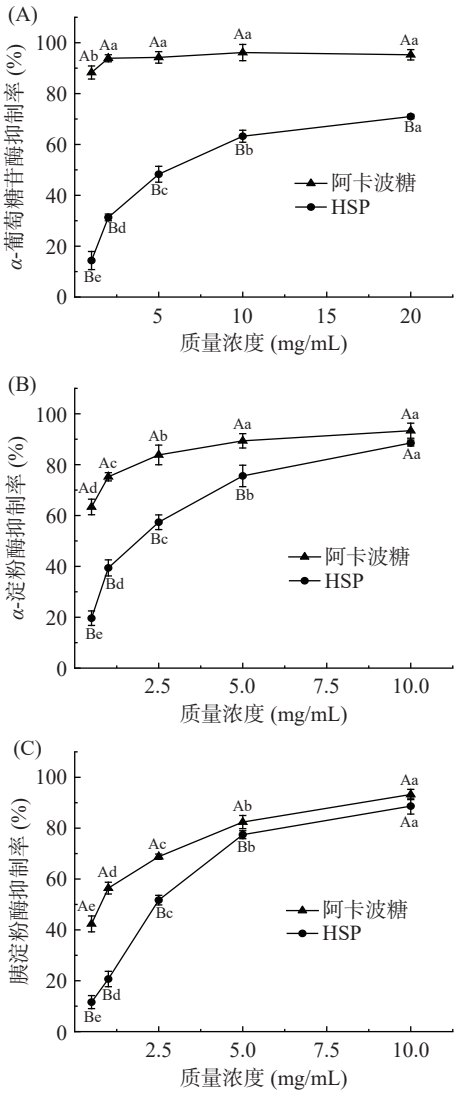


图 3 HSP 对 α-葡萄糖苷酶(A)、α-淀粉酶(B)及胰淀粉酶(C)的抑制活性

Fig.3 Inhibitory activity of HSP on α-glucosidase (A), α-amylase (B), and pancreatic amylase (C)

对 α-葡萄糖苷酶抑制率达到 45.83%, 在质量浓度为 1.0 mg/mL 时, 对 α-淀粉酶抑制率达到 65.45%, 该结果与本实验中 HSP 的抑制作用基本一致。

2.6 HSP 对 α-淀粉酶抑制的可逆性分析

α-淀粉酶是调控餐后血糖上升的关键消化酶, 抑制其活性可有效延缓碳水化合物的分解与葡萄糖的吸收, 从而发挥降血糖作用。通过固定底物可溶性淀粉溶液的浓度及用量, 改变 α-淀粉酶的添加量, 测定不同质量浓度 HSP 对 α-淀粉酶反应速率的影响, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 在相同 HSP 质量浓度下, 酶促反应速率随 α-淀粉酶添加量的增加而升高。在不同 HSP 质量浓度下, 酶促反应速率与 α-淀粉酶添加量的线性拟合曲线均基本通过原点, 且曲线斜率随 HSP 质量浓度的升高而降低。说明 HSP 并非通过降低体系中的有效酶量抑制酶活, 而是通过非共价键(疏水相互作用、氢键等)与 α-淀粉酶相互作用, 导致

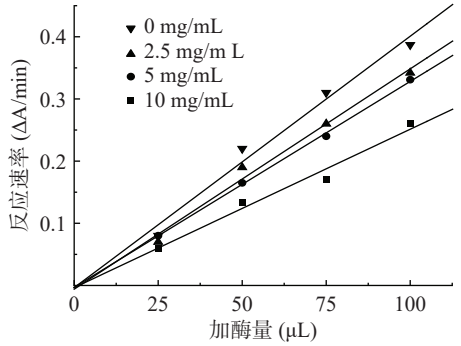


图 4 不同质量浓度 HSP 对 α-淀粉酶反应速率的影响

Fig.4 Effect of varying concentrations of HSP on the reaction rate of α-amylase

酶活力降低。由此表明, HSP 对 α-淀粉酶的抑制作用方式为可逆抑制。

2.7 HSP 对 α-淀粉酶的抑制类型分析及动力学常数计算

以底物浓度的倒数(1/[S])为横坐标, 酶促反应速率的倒数(1/V)为纵坐标, 绘制不同质量浓度 HSP 条件下的 Lineweaver-Burk 双倒数曲线, 结果如

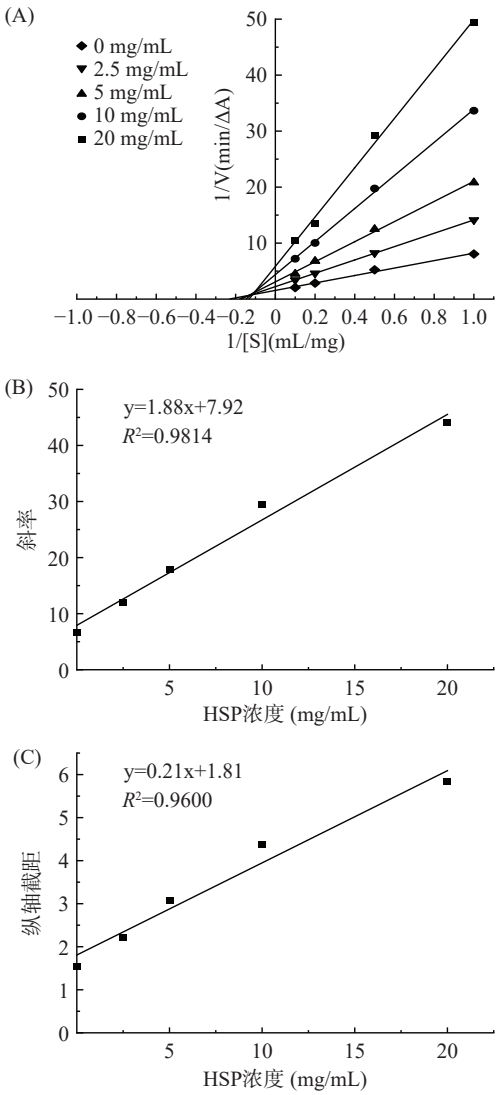


图 5 HSP 对 α-淀粉酶的抑制动力学

Fig.5 Inhibitory kinetics of HSP on α-amylase

图 5(A)所示，相应拟合曲线的回归方程及相关参数见表 4。

表 4　HSP 对 α-淀粉酶的抑制动力学参数

Table 4　Inhibitory kinetic parameters of HSP on α-amylase

HSP浓度（mg/mL）	回归方程	R^2	K_m(mg/mL)	V_{max}（ΔA/min）
0	y=6.65x+1.55	0.9879	4.29	0.65
2.5	y=11.91x+2.23	0.9999	5.34	0.45
5	y=17.96x+3.07	0.9962	5.85	0.33
10	y=29.53x+4.37	0.9982	6.76	0.23
20	y=44.06x+5.85	0.9946	7.53	0.17

如图 5(A)所示，各拟合曲线相交于第二象限，且随着 HSP 质量浓度的增加，其对应曲线的斜率(K_m/V_{max})逐渐增大，纵轴截距($1/V_{max}$)也相应升高；由表 4 可知，随着 HSP 质量浓度的增大，米氏常数 K_m 值由 4.29 mg/mL 增至 7.53 mg/mL，最大反应速率 V_{max} 值由 0.65 ΔA/min 降至 0.17 ΔA/min，表明其抑制动力学特点符合竞争性与非竞争性的混合型抑制。该结果说明 HSP 既能与游离的 α-淀粉酶结合，通过与底物竞争酶的活性中心阻碍酶-底物复合物的形成，降低酶促反应速率；又能与酶-底物复合物结合，形成酶-底物-抑制剂复合物，从而抑制酶促反应进程。研究表明，青稞多糖[31]、铁皮石斛多糖[47]、枯草芽孢杆菌胞外多糖[48]对 α-淀粉酶的抑制作用均属于竞争性与非竞争性的混合型抑制，与本研究结果一致。

利用表 4 中的数据，以不同 HSP 质量浓度下拟合曲线的斜率和纵轴截距分别对 HSP 浓度进行二次作图，结果如图 5(B)、图 5(C)所示。根据式(8)、式(9)分别计算得出抑制常数(K_I)为 4.21 mg/mL，酶-底物复合物抑制常数(K_{IS})为 8.62 mg/mL。$K_I<K_{IS}$ 表明 HSP 对游离 α-淀粉酶的亲和力强于对酶-底物复合物的亲和力，进一步支持其混合型抑制机制。

3　结论

本研究通过单因素实验结合响应面法优化了 cHSP 的醇沉工艺，并系统评价 HSP 的体外抗氧化活性与降血糖功能。结果表明，HSP 具有一定的自由基清除能力，对 $ABTS^+$、DPPH 和羟基自由基的 IC_{50} 值分别为 3.38、1.53 和 3.36 mg/mL；在体外降血糖活性方面，HSP 对 α-葡萄糖苷酶、胰淀粉酶和 α-淀粉酶均表现出较好的抑制作用，其中对 α-淀粉酶的抑制活性最强，IC_{50} 值为 2.08 mg/mL，揭示其可能具有调控餐后血糖的潜力。酶抑制动力学分析表明，HSP 对 α-淀粉酶的抑制作用为混合型抑制，且 HSP 更易与游离酶结合，通过占据活性位点降低酶促反应速率。

多糖的生物活性与其结构特征密切相关。本研究初步推测，HSP 的抗氧化活性可能源于其所含的阿拉伯木聚糖，而其对 α-葡萄糖苷酶、胰淀粉酶和 α-淀粉酶的抑制作用，则可能与黄水中含有源自酿酒酵母细胞壁的水溶性 β-葡聚糖有关。然而，本研究仅初步分离获得 HSP，其构效关系仍需深入探讨。后续工作将聚焦 HSP 的结构解析，并在细胞水平上探究 HSP 的抗氧化与降血糖作用机制，为其作为天然抗氧化剂及潜在功能性降血糖因子的开发提供理论支持。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] REN Z Q, CHEN Q X, TANG T X, et al. Unraveling the water source and formation process of *Huangshui* in solid-state fermentation[J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34: 665−675.

[2] 郭双海. 黄水的化学组分、微生物组成及综合利用研究进展[J]. 中国酿造, 2023, 42(7): 25−29. [GUO S H. Research progress on the chemical component, microbial composition and comprehensive utilization of *Huangshui*[J]. China Brewing, 2023, 42(7): 25−29.]

[3] 盛杰, 徐亚超, 纪海玉, 等. 白酒发酵副产物黄水有机成分分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(19): 231−235. [SHENG J, XU Y C, JI H Y, et al. Analysis of organic components of yellow water from liquor fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(19): 231−235.]

[4] JIANG Y S, SUN J Y, CHANDRAPALA J, et al. Current situation, trend, and prospects of research on functional components from by-products of Baijiu production: A review[J]. Food Research International, 2024, 180: 114032.

[5] ZHANG X Y, ZHANG H W, ZHANG Z Y, et al. Recent advances in resource utilization of *Huangshui* from Baijiu production[J]. Fermentation, 2024, 10(6): 310.

[6] 卢中明, 范昌明, 杜礼泉, 等. 利用酿酒副产物黄水、酒尾开发调酒液的研究[J]. 酿酒, 2022, 49(1): 92−97. [LU Z M, FAN C M, DU L Q, et al. Study on the development of wine liquor-blending liquid by using yellow water and wine tail[J]. Liquor Making, 2022, 49(1): 92−97.]

[7] XIA Q, WU C D, HUANG J, et al. Selection and application of potential whole-cell enzymes in the esterification of *Huangshui*, a by-product formed during Chinese liquor-making[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2014, 120(1): 45−51.

[8] 杨铭, 李亚男, 陈正行, 等. 黄浆水酯化液工艺优化及关键风味物质分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(12): 160-168. [YANG M, LI Y N, CHEN Z X, et al. Optimization of Huangshui esterification process and analysis of key flavor compounds[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(12): 160-168.]

[9] 张会敏, 孟雅静, 王艳丽, 等. 新老窖池黄水的差异性及静置培养对其影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 215−222. [ZHANG H M, MENG Y J, WANG Y L, et al. Differences between Huangshui from old and young mud pits of Chinese strong-flavor liquor and effect of static culture on it[J]. Food Science, 2020, 41(2): 215−222.]

[10] ZHANG X Y, ZHANG H W, WANG R X, et al. Bioconversion of Baijiu Huangshui for single cell protein using *Saccharomyces cerevisiae*: A study on influence of carbon metabolic pathways[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 393: 127077.

[11] HUANG Y G, YE Y L, XU D P, et al. Structural characteri-

zation and anti-inflammatory activity of a novel neutral polysaccharide isolated from *Smilax glabra* Roxb[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 234: 123559.
[12] SU S Y, DING X, HOU Y L, et al. Structure elucidation, immunomodulatory activity, antitumor activity and its molecular mechanism of a novel polysaccharide from *Boletus reticulatus* Schaeff [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 647−661.
[13] WANG X Z, LI X, ZHANG L Y, et al. Recent progress in plant-derived polysaccharides with prebiotic potential for intestinal health by targeting gut microbiota: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(33): 12242−12271.
[14] ZHOU Y, CHEN X X, CHEN T T, et al. A review of the antibacterial activity and mechanisms of plant polysaccharides[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 264−280.
[15] 廖勤俭, 王芳, 李芹, 等. 黄水肽的分离鉴定及其潜在的血管紧张素转换酶抑制活性[J/OL]. 食品与发酵工业, 2025-09-10. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043234. [LIAO Q J, WANG F, LI Q, et al. Isolation and identification of *Huangshui* peptides and their potential inhibitory activity of angiotensin-converting enzyme[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2025-09-10. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043234.]
[16] 裴文豪, 廖勤俭, 李杨华, 等. 酿酒黄水粗多糖与纯化多糖的体外肠道益生活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(19): 127−134. [PEI W H, LIAO Q J, LI Y H, et al. *In vitro* intestinal probiotics activity of crude and purified polysaccharides from *Huangshui*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(19): 127−134.]
[17] LI M, SU J, WU J H, et al. The prebiotic activity of a novel polysaccharide extracted from *Huangshui* by fecal fermentation *in vitro*[J]. Foods, 2023, 12: 4406.
[18] HUO J Y, WU J H, ZHAO M M, et al. Immunomodulatory activity of a novel polysaccharide extracted from *Huangshui* on THP-1 cells through NO production and increased IL-6 and TNF-α expression[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127257.
[19] HUO J Y, LI M, WEI J W, et al. RNA-seq based elucidation of mechanism underlying the protective effect of *Huangshui* polysaccharide on intestinal barrier injury in Caco-2 cells[J]. Food Research International, 2022, 162: 112175.
[20] WANG Z H, ZHANG M, HAO L Y, et al. Two novel polysaccharides from *Huangshui*: purification, structure, and bioactivities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131396.
[21] SU H X, FAN W L, YAN X, et al. Preparation, identification, and molecular docking of novel angiotensin-converting enzyme inhibitory peptides derived from rice-based distillers' spent cakes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(11): 6506−6517.
[22] 沈赤. 绍兴黄酒多糖的分离提取、生物活性及其对肠道微生物的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2014. [SHEN C. The separation and extraction, biological activities of polysaccharides from Shaoxing rice wine and their effects on intestinal microflora[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.]
[23] 曹建昌, 李若彤, 曾芬, 等. 藜蒿秆多糖提取工艺优化及抗氧化、α-葡萄糖苷酶抑制活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 282−291. [CAO J C, LI R T, ZENG F, et al. Optimisation of extraction process of polysaccharides from *Artemisia Selengensis* turcz stems and analysis of its antioxidant and α-glucosidase inhibitory activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 282−291.]
[24] 檀茜倩, 王晓晴, 杨兆欣, 等. 木瓜蛋白酶水解及黏质沙雷菌发酵对海参卵多糖结构及益生特性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(4): 83−92. [TAN X Q, WANG X Q, YANG Z X, et al. Effects of papain hydrolysis and *serratia marcescens* fermentation on the structures and prebiotic characteristics of sea cucumber ovum polysaccharides[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(4): 83−92.]
[25] CHEN W, GAO L, SONG L R, et al. An improved phenol-sulfuric acid method for the quantitative measurement of total carbohydrates in algal biomass[J]. Algal Research, 2023, 70: 102986.
[26] 唐敏, 冷悦, 王淑敏, 等. 猴头菌与人参双向固体发酵菌质体外抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 154−161. [TANG M, LENG Y, WANG S M, et al. *In vitro* antioxidant activity analysis of the bi-directional solid fermentation plasm of *Hericium erinaceus* and ginseng[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 154−161.]
[27] ZHAO J L, ZHANG M P, ZHOU H L. Microwave-assisted extraction, purification, partial characterization, and bioactivity of polysaccharides from *Panax ginseng*[J]. Molecules, 2019, 24(8): 1605.
[28] MOLOLE G J, GURE A, ABDISSA N. Determination of total phenolic content and antioxidant activity of *Commiphora mollis* (Oliv.) Engl. resin[J]. BMC Chemistry, 2022, 16(1): 48.
[29] 任蕊蕊, 孙建瑞, 范嘉琦, 等. 基于深共晶溶剂的桔梗多糖提取、表征及抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 1−10. [REN R R, SUN J R, FAN J Q, et al. Extraction, characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Platycodon grandiflorum* based on deep eutectic solvent[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 1−10.]
[30] 林杉, 赵萍, 付云娜, 等. 羊肚菌胞外多糖液态发酵培养基配方优化及其体外降血糖活性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 196−203. [LIN S, ZHAO P, FU Y N, et al. Optimization of liquid fermentation medium formulation of *Morchella eohespera* exopolysaccharide and its hypoglycemic activity *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 196−203.]
[31] 李志鹏, 周晨熠, 潘书童, 等. 2 种青稞多糖对胰 α-淀粉酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 192−199. [LI Z P, ZHOU C Y, PAN S T, et al. Inhibitory effects of two polysaccharides from highland barley on the activity of pancreatic α-amylase[J]. Food Science, 2023, 44(22): 192−199.]
[32] DHITAL S, GIDLEY M J, WARREN F J. Inhibition of α-amylase activity by cellulose: kinetic analysis and nutritional implications[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 123: 305−312.
[33] ZHU H, XU L, WANG J, et al. Rheological behaviors of ethanol-fractional polysaccharides from *Dendrobium officinale* in aqueous solution: effects of concentration, temperature, pH, and metal ions[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108311.
[34] 郑夺, 张岩, 王文彤, 等. 响应面分析法优化苦豆子多糖的醇沉工艺[J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(16): 27−29. [ZHENG D, ZHANG Y, WANG W T, et al. Optimization of alcohol precipitation technology of polysaccharides from *Sophora alopecuroides* by response surface methodology[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2013, 19(16): 27−29.]
[35] 陈玉鹏, 樊德鹏, 石洁, 等. 枸杞果渣粗多糖提取工艺优化及体外抗氧化活性分析[J]. 新疆农业科学, 2025, 62(9): 2251−2262. [CHEN Y P, FAN D P, SHI J, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from *Lycium barbarum* pomace and *in vitro* analysis of antioxidant activity[J]. Xinjiang Agricultural Sci-

ences, 2025, 62(9): 2251−2262.］
［36］ FAN R Y, MAO G L, XIA H Q, et al. Chemical elucidation and rheological properties of a pectic polysaccharide extracted from *Citrus medica* L. fruit residues by gradient ethanol precipitation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 198: 46−53.
［37］ 王海东, 张涵, 周泓妍, 等. 响应面法优化五味子蛋白肽的制备工艺及其体外抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 166−176.［WANG H D, ZHANG H, ZHOU H Y, et al. Optimization of preparation technology and antioxidant activity of *Schisandrae chinensis* protein peptides *in vitro* by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 166−176.］
［38］ 张富勇, 苏建, 刘阳, 等. 黄水抗氧化活性的初步研究[J]. 酿酒科技, 2018(7): 23−26.［ZHANG F Y, SU J, LIU Y, et al. Preliminary study of antioxidant activity of yellow water[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2018(7): 23−26.］
［39］ 黎莲. 白酒丢糟多糖的制备与结构表征及其生物活性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.［LI L. Preparation, structural characterization, and bioactivities of polysaccharides from Baijiu distilled grain waste[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024.］
［40］ GUO Q B, XIAO X Y, LU L F, et al. Polyphenol-polysaccharide complex: preparation, characterization, and potential utilization in food and health[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2022, 13: 59−87.
［41］ 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, 2015, 2016: 5692852.
［42］ XU H L, WU Z Y, ZHAO D, et al. Preparation and characterization of electrospun nanofibers-based facial mask containing hyaluronic acid as a moisturizing component and Huangshui polysaccharide as an antioxidant component[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 214: 212−219.
［43］ 颜金鑫, 戚向阳, 杨华, 等. 高粱阿拉伯木聚糖的分离提取及其特性[J]. 中国食品学报, 2025, 25(5): 303−316.［YAN J X, QI X Y, YANG H, et al. Isolation, extraction and characteristic of sorghum bran arabinoxylans[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(5): 303−316.］
［44］ JAGADEESAN G, MUNIYANDI K, MANOHARAN A L, et al. Understanding the bioaccessibility, *α*-amylase and *α*-glucosidase enzyme inhibition kinetics of *Allmania nodiflora*(L.)R. Br. ex wight polyphenols during *in vitro* simulated digestion[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131294.
［45］ DENG Y J, HUANG L X, ZHANG C H, et al. Novel polysaccharide from *Chaenomeles speciosa* seeds: structural characterization, *α*-amylase and *α*-glucosidase inhibitory activity evaluation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 755−766.
［46］ 李赛芬, 曹桦强, 李涵, 等. 水溶性酵母 *β*-葡聚糖的制备及体外抗氧化、降糖活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 152−159.［LI S F, CAO H Q, LI H, et al. Preparation and *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activities of water-soluble yeast *β*-glucan[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 152−159.］
［47］ 潘毓慧. 富含铁皮石斛多糖的产品开发及其体外降血糖活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.［PAN Y H. The development of the product containing the high content of *Dendrobium officinale* polysaccharide and its *in vitro* hypoglycemic activities evaluation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.］
［48］ ZHANG L, KONG H C, LI Z F, et al. Physicochemical characterizations, *α*-amylase inhibitory activities and inhibitory mechanisms of five bacterial exopolysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 249: 126047.