

白酒糟功能性成分提取与高值化应用研究进展

王彦勇 郭双海

(邯郸科技职业学院, 河北 邯郸 056046)

摘要:白酒糟是酿酒工业的重要副产物, 固态或液态多菌种发酵赋予了其复杂的化学组成和功能特性, 具有较高的开发潜力。文章阐述了白酒糟的化学组成, 论述了不同香型酿造工艺造成的功能组分差异, 评估了针对蛋白质、膳食纤维、多酚等核心组分的先进提取工艺, 总结了白酒糟提取物在抗氧化、降血压、免疫调节等方面的生物活性及作用机制, 并探讨了其作为功能性食品配料的应用前景。

关键词:白酒糟; 功能性成分; 提取工艺; 高值化应用; 生物活性

Research progress on the extraction of functional components from Chinese Baijiu distiller's grains and their high-value applications

WANG Yanyong GUO Shuanghai

(Handan Vocational College of Science and Technology, Handan, Hebei 056046, China)

Abstract: Chinese Baijiu distiller's grains represent a major by-product of the Baijiu brewing industry. The solid-state or liquid-state multi-strain fermentation process endows them with complex chemical compositions and functional properties, conferring considerable potential for further development. This study describes the chemical composition of Chinese Baijiu distiller's grains, discusses the differences in functional components arising from the brewing processes of various Baijiu aroma types, and evaluates advanced extraction techniques targeting core components, including proteins, dietary fibers, and polyphenols. The biological activities of Chinese Baijiu distiller's grain extracts, such as antioxidant, antihypertensive, and immunoregulatory effects, as well as their underlying mechanisms of action, are summarized. Furthermore, the application prospects of these extracts as functional food ingredients are also explored.

Keywords: Chinese Baijiu distiller's grain; functional component; extraction technology; high-value application; biological activity

白酒糟, 即高粱、小麦等谷物原料经蒸煮、发酵、蒸馏后产生的废弃物, 是白酒产业最主要的副产物^[1]。据统计^[2], 生产 1 t 白酒会产生 3~4 t 的鲜酒糟。长期以来, 白酒糟的利用方式较为传统和粗放, 主要作为动物饲料、有机肥料和制备沼气的原料等^[2]。这些途径虽然在一定程度上实现了废弃物的资源化, 但难以完全消化中国酿酒业产生的白酒糟, 也未能充分挖掘其潜在的经济和功能价值。随着国家生态文明建设的深入和环保政策的日趋严格, 推动白酒糟的减量化、无害化处理及高附加值资源化利用已成为白酒行业可持续发展的必然要求。

据测定, 脱水后的白酒糟中有机质含量超过 80%,

并富含蛋白质 (15~25 g/100 g)、纤维素 (约 28 g/100 g)、淀粉, 以及多酚、有机酸、维生素和矿物质等^[3-6]。这一复杂的化学组成决定了白酒糟具备向高值化功能产品转化的巨大潜力。近年来, 全球食品工业正经历向循环生物经济的转型, 将农食副产物转化为高价值功能性成分已成为研究热点。在此背景下, 对白酒糟的认知正从“环境负担”向“生物活性宝库”转变。文章拟综述近年来白酒糟在食品高值化功能利用方面的研究进展, 分析其潜在的食品开发前景和面临的主要挑战, 以期对白酒糟的深度开发和全产业链价值提升提供科学依据和新的思路。

基金项目: 邯郸科技职业学院自然科学课题项目 (编号: KZ202504)

通信作者: 郭双海 (1973—), 男, 邯郸科技职业学院副教授, 硕士。E-mail: guoshuanghaij@163.com

收稿日期: 2025-09-04 **改回日期:** 2026-04-26

引用格式: 王彦勇, 郭双海. 白酒糟功能性成分提取与高值化应用研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 242-248.

Citation: WANG Yanyong, GUO Shuanghai. Research progress on the extraction of functional components from Chinese Baijiu distiller's grains and their high-value applications[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 242-248.

1 白酒糟的理化特性及不同香型白酒糟核心组分差异

白酒糟的成分不仅继承自酿造原料,更受其独特的酿造工艺的影响,尤其是不同香型白酒的生产过程,赋予了白酒糟独特的特性,这为其精准化、高值化利用奠定了基础^[5]。

1.1 基本化学组成与功能活性物质

白酒糟中保留了大量未被充分利用的营养素及矿物质,其含量随酿酒原料和工艺不同而有所差异(见表1)。其中粗蛋白质占14.30~26.42 g/100 g,是最具价值的组分之一,主要来源于高粱等谷物^[6-7],且醇溶性蛋白比例较高^[8]。这类蛋白因高度疏水和结构稳定,虽增加提取难度,但在特定食品体系中具有功能潜力。白酒糟中仍含9.13~22.41 g/100 g的残余淀粉,粗纤维含量高达10.17~31.67 g/100 g,显著高于多数农业副产物,其纤维主要来源于谷物麸皮及添加的稻壳^[9]。其纤维主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维的含量分别为20.93~49.69, 34.86~58.72 g/100 g。此外,白酒糟富含钙、磷、铁、锰、锌等矿物质元素,其中铁(87.5~190.3 mg/100 g)和锰(14.8~24.8 mg/100 g)含量尤为突出。

除矿物质外,发酵过程中的复杂代谢赋予了白酒糟丰富的生物活性物质。其酚类化合物含量达4.78~7.67 mg/g,主要包括酚酸、黄酮和单宁,具抗氧化、抗菌和抗炎等活性^[10]。部分多酚以“结合态”形式存在,通过酯键或糖苷键与细胞壁多糖结合,提高提取难度,但也赋予缓释功能潜力。此外,白酒糟中还含较多有机酸(可达0.77 mg/g)及少量酯类风味物质(如己酸乙酯、乳酸乙酯)^[11],拓展了其功能化应用前景。

表1 白酒糟中的营养成分含量^[5-11]
Table 1 Nutrient content of Chinese Baijiu distiller's grains

营养成分	单位	含量
粗蛋白	g/100 g	14.30~26.42
淀粉	g/100 g	9.13~22.41
粗脂肪	g/100 g	2.00~15.56
粗纤维	g/100 g	10.17~31.67
中性洗涤纤维	g/100 g	34.86~58.72
酸性洗涤纤维	g/100 g	20.93~49.69
钙	mg/100 g	0.29~0.80
磷	mg/100 g	0.19~0.73
铁	mg/100 g	87.50~190.30
铜	mg/100 g	1.58~33.30
锰	mg/100 g	14.80~24.80
锌	mg/100 g	5.20~10.80
酚类物质	mg/g	4.78~7.67
酯类	mg/g	0.280~1.168
有机酸	mg/g	0.77

1.2 主要香型白酒糟核心组分差异

将“白酒糟”视为均质原料是其高值化研究中的一个常见误区。不同香型白酒的酿造工艺差异巨大,直接导致其白酒糟的化学组成存在显著区别,这种差异性是实现其精准利用的关键决定因素。

1.2.1 酱香型白酒糟 酱香型白酒糟以高温制曲、多轮次发酵和蒸馏为特征,使原料(主要为高粱)经历深度的生物转化。高温制曲和堆积发酵过程促进了剧烈的美拉德反应和焦糖化反应,而多轮次蒸煮和发酵则反复破坏高粱细胞壁,导致细胞内更多的蛋白质和结合态酚类物质得以释放和转化。因此,酱香型白酒糟通常呈现“三高一低”的特点,即蛋白质(可达26.4 g/100 g)、脂肪和总酚含量高,而纤维含量相对较低^[11]。同时,长时间、高温的发酵过程富集了大量的微生物菌体和耐热代谢产物,如四甲基吡嗪等赋予酱香风味的关键前体物质^[12]。基于上述特性,酱香型白酒糟更适宜作为高活性抗氧化肽、复杂酚类化合物及特色风味前体物质的优质原料。

1.2.2 浓香型白酒糟 浓香型白酒产生过程中的黄水回窖和泥窖发酵,使发酵物中形成了富含己酸菌等耐酸、产酯功能菌的独特微生态环境^[12]。这种环境选择压力直接导致浓香型白酒中富集了大量的有机酸(尤其是己酸、乳酸)及其酯类前体物质,这些是浓香型白酒典型风味的重要来源^[13]。因此,相较于其他香型白酒糟,浓香型白酒糟在作为生物发酵底物生产特定有机酸、酯类风味前体或天然香料方面具有更为突出的应用优势。

1.2.3 清香型白酒糟 清香型白酒糟是清香型白酒酿造的副产物。与酱香型或浓香型白酒糟相比,清香型白酒糟保留了较高比例的挥发性前体物质、低分子酯类以及未完全转化的发酵底物,这些成分赋予其在功能性成分提取和风味前体开发中的独特潜力^[14]。由于白酒中的香气活性物质(如醇类和酯类)在白酒糟中仍有一定残留,其含量直接影响后续高值化利用策略的选择^[14]。因此,清香型白酒糟因其丰富的风味前体物质,成为功能性食品开发和高值化利用的重要原料。

1.2.4 米香型白酒糟 米香型白酒通常以大米为主要原料经糖化、发酵与蒸馏而成,因此米香型白酒糟化学组成具有与谷物基质更接近的特性。与其他香型白酒糟相比,米香型白酒糟中的残留淀粉、低聚糖、蛋白质、氨基酸及膳食纤维含量相对较高^[15]。这类白酒糟中挥发性风味前体含量较低,但其富集的可溶性糖类、膳食纤维及水溶性多酚等组分,使其在淀粉衍生物、益生元型功能性成分以及膳食纤维增强产品的开发方面具有潜在优势。

不同来源白酒糟的主要化学成分存在明显差异。这种组分上的差异性直接决定了其后续高值化利用的技术路线选择。

2 白酒糟中功能性成分的提取技术

从白酒糟复杂基质中高效、经济且绿色地分离目标

功能性成分,是实现其高值化利用的技术核心。白酒糟的木质纤维素结构坚固且不易降解,这一特性成为所有提取过程面临的首要障碍。因此,有效解构白酒糟的细胞壁以暴露目标组分,是提高蛋白质、多糖、多酚等功能性成分提取效率的前提。因此,所有提取策略都面临一个共同的挑战:必须先有效解构白酒糟的细胞壁屏障,

才能为后续的溶剂萃取或酶解反应打开通道^[16-22]。因此,对不同功能性成分提取技术从效率、选择性、工业可扩展性及可持续性等方面进行系统评估,对于指导白酒糟高值化利用的技术路线选择具有重要意义。白酒糟中不同活性成分的提取方法、原理及优缺点如表 2 所示。

表 2 白酒糟中不同活性目标组分的提取方法、原理及优缺点比较

Table 2 Extraction methods, principles, advantages, and disadvantages of different active target components in Chinese Baijiu distiller's grains

目标组分	提取方法	核心原理	提取效果	优缺点	参考文献
蛋白质/活性肽	碱性/酸性乙醇提取	改变溶剂极性,溶解疏水性醇溶蛋白	总蛋白回收率可达 55%	提取率较高;可能导致蛋白质变性,影响功能	[19]
	酶解法	利用蛋白酶将大分子蛋白质水解为小分子肽	产物活性高(如 DPPH 自由基清除率>90%)	条件温和,能保持或产生生物活性;酶成本较高	[20]
可溶性膳食纤维	酶法提取	酶解细胞壁多糖,释放可溶性组分	可溶性膳食纤维含量达 11.7 g/100 g	选择性强,条件温和;酶成本高,反应时间长	[23]
	超声波辅助提取	超声空化效应破壁,碱法增溶	可溶性膳食纤维含量达 24.55 g/100 g	提取效率高,时间短;能耗较高,可能降解多糖	[24-25]
有机酸	回流提取法	利用水或乙醇为溶剂进行萃取分离	乳酸含量达 1.84 g/100 g	操作简便,能耗较低,效率高;不适用于热敏性成分	[11,26]
	超声波辅助提取	超声的空化效应加速基质穿透,促进溶出	富里酸得率达 6.29 g/100 g	提取效率高,尤其适合微量组分;活性成分易降解	[27]
	微生物发酵法	酒糟为碳源,通过特定微生物发酵转化有机酸	D-乳酸产量可达 27.9 g/L	可生产高纯度、高价值特定产物;工艺流程复杂	[27]
酚类物质	乙醇热回流法	利用乙醇作为溶剂提取游离酚	总酚提取率可达 29.36%	操作简单,成本较低;对结合酚提取效率低	[10,28]
	酶法辅助提取	水解酯键,释放与多糖结合的酚类	酚酸释放量增加 1.5 倍	显著提高总酚得率,靶向性强;酶成本高	[29-30]

2.1 细胞壁屏障的解构

预处理是白酒糟功能性成分高效提取的关键环节。物理方法,如超声波和脉冲电场,通过空化效应或电穿孔效应破坏细胞结构,增强溶剂渗透,从而提高提取效率^[21-30]。研究^[21]表明,超声波预处理可使蛋白质提取率提高至 68.68%,而脉冲电场技术比传统超声辅助提取的效率高出 13.81%。这些技术效率高、速度快,但能耗较高。相比之下,酶法预处理利用纤维素酶、半纤维素酶等在温和条件下特异性地水解细胞壁多糖,选择性强且环境友好,但面临酶成本高和反应时间长等挑战^[23]。未来趋势在于将物理方法(短时、高效)与酶法(精准、温和)相结合,以协同作用实现细胞壁的快速、高效的解构。

2.2 目标组分的高效溶出与纯化

白酒糟中残留的蛋白质含量较高,但由于被纤维素等大分子物质包裹,其生物利用率有限^[17]。现代生物技术可以将这些蛋白质转化为相对分子质量更小、活性更强的生物活性肽,从而显著提升其功能性和附加值。该过程不仅实现了蛋白质的高效提取,更为开发具有特定

生理功能的食品原料提供了可能。

(1) 蛋白质/活性肽:传统的碱性/酸性乙醇法利用溶剂改变蛋白质疏水作用,可实现较高的总蛋白回收率。例如,采用碱性乙醇法(氢氧化钠—乙醇)或酸性乙醇法(盐酸—乙醇),在最优条件下总蛋白回收率可达到 55%^[19],适用于制备生物材料等大宗产品。然而,这种方法可能导致蛋白质变性,影响其生物活性。酶解法是一种更为有效的策略,通过特异性蛋白酶(如碱性蛋白酶)将白酒糟中的大分子蛋白质定向水解为小分子生物活性肽,这些肽具有特定生理功能,如降血压和抗氧化作用^[20]。这两种策略并非相互排斥,而是互为补充;碱性/酸性溶剂法侧重于蛋白质的高产率,而酶解法则更强调活性和功能性,应根据目标产品的价值定位选择合适的策略。

(2) 膳食纤维:超声波辅助碱法提取可溶性膳食纤维的得率可高达 24.55 g/100 g,而单纯的酶法提取率约为 11.7 g/100 g^[23]。然而,产率并非唯一评价指标。高强度的化学处理可能破坏多糖的精细结构,从而影响其作为益生元的生物功能。尽管温和的酶法提取产率相对较

低,但能够更好地保持多糖的天然结构完整性,这对于其在肠道内被特定益生菌识别和发酵具有重要作用。因此,在开发高端功能性食品时,应更加关注功能活性的保持,而非单纯追求产率最大化。

(3) 有机酸:除了直接从白酒糟中提取天然存在的有机酸,白酒糟还可以作为一种极具潜力的碳源底物,通过生物发酵来生产特定的高附加值有机酸。例如,通过对白酒糟进行碱化预处理和酶解,再利用微生物进行同步糖化发酵,能够高效地将白酒糟水解液转化为D-乳酸,产量高达27.9 g/L,且纯度达到99.9%^[27]。

(4) 酚类物质:酚类物质的提取面临的核心挑战在于结合酚的释放。传统乙醇热回流法主要针对游离酚,提取效率有限,即使在优化条件下,总酚提取率也仅可达到29.36%^[28]。为提高结合酚的回收率,目前常采用整合工艺:先通过超声波等物理预处理增加白酒糟的比表面积和孔隙率,从而改善酶的可及性;随后利用阿魏酸酯酶等特异性水解酶切断酚类物质与细胞壁多糖之间的酯键,将不溶性结合酚高效释放^[29]。研究^[30]证实,酶法辅助可使酚酸释放量增加1.5倍。这种整合方法是最大化总酚得率和生物活性的关键。

3 提取物的功能特性及其在食品领域的创新应用

将从白酒糟中分离的功能性成分开发为食品原料,是实现其高值化利用的重要环节^[31]。这一过程不仅需验证其生物活性,还应明确其作用机制,以指导在食品体系中的合理应用。白酒糟中不同活性目标组分的功能特性、作用机制及在食品中的应用概况如表3所示。

3.1 功能性蛋白质与肽的应用潜力

白酒糟蛋白及其水解产物表现出一定的生物活性,

相关研究主要集中于抗氧化和降血压作用。其抗氧化能力通常与蛋白水解产生的活性肽有关,白酒糟中残留的酚类物质也可能通过协同作用增强自由基清除能力。研究^[13]显示,白酒糟蛋白(0.625 mg/mL)的DPPH自由基清除率达92.31%,并能有效保护HepG2细胞免受氧化损伤。挤压加工等物理改性可通过减小颗粒尺寸、形成多孔结构,改善白酒糟蛋白的自由基清除能力^[30]。除整体蛋白外,部分酶解肽段也具有较强抗氧化活性^[32]。Wei等^[31]利用UPLC-Q-TOF/MS技术鉴定了VPSGK、LH等多种抗氧化肽,说明白酒糟蛋白具有开发抗氧化活性肽的潜力。白酒糟亦是血管紧张素转化酶(ACE)抑制肽的重要来源。例如,白酒糟中酪氨酸-甘氨酸-天冬氨酸三肽的IC₅₀值低至5.21 μmol/L^[33]。Wei等^[31]进一步在水溶性级分中鉴定出6种ACE抑制肽,表明适宜的酶解处理有助于从白酒糟蛋白中获得多种功能性肽类物质。此外,白酒糟中的醇溶蛋白因具有较好的成膜性和疏水特征,可作为可降解食品包装材料的潜在原料。高粱白酒糟醇溶蛋白富含α-螺旋结构,具有较好的热稳定性和成膜性能,其变性温度可达123.47℃。以其制备的蛋白膜表现出一定的阻水性和阻油性^[34]。此外,将高粱白酒糟醇溶蛋白与细菌纤维素复合,可改善膜材料的力学性能和阻湿性能^[34];若进一步与壳聚糖复配,并添加乳酸链球菌肽和抗坏血酸,则有助于提升其在葡萄保鲜中的应用效果^[35]。需要注意的是,不同来源醇溶蛋白的成膜性能存在差异。例如,小麦白酒糟醇溶蛋白膜因力学性能较弱,直接用于食品包装仍存在一定限制,但其亲水性特征使其在农业控释基质等领域具有潜在应用价值。

3.2 生物活性多糖及其应用潜力

白酒糟中的生物活性多糖以膳食纤维为代表,具有一定的功能特性和开发利用价值。研究^[6]表明,挤压加工

表3 白酒糟中不同活性目标组分的功能特性、作用机制及在食品中的应用

Table 3 Functional properties, mechanisms, and food applications of active components in Chinese Baijiu distiller's grains

目标提取物	核心功能特性	具体作用机制与关键指标	食品中的应用潜力	参考文献
生物活性肽	降血压、抗氧化	降血压:抑制血管紧张素转化酶(ACE);抗氧化:清除自由基	开发针对心血管健康的饮料、营养棒或膳食补充剂,能够延长保质期的可食性包装膜	[32-35]
可溶性膳食纤维	益生元、免疫调节	益生元效应:作为肠道有益菌(如双歧杆菌)的底物,促进其增殖并产生短链脂肪酸;免疫调节:阿魏酰化寡糖(FOs)能显著抑制促炎因子分泌	作为功能性纤维强化剂,添加到面包、饼干、酸奶和饮料中,以提升产品的健康价值	[36-40]
有机酸	抗菌防腐、酸度调节	抗菌防腐:通过降低pH值和破坏细胞膜来抑制微生物生长;酸度调节:作为公认安全的食品添加剂,提供酸味和调节pH值	作为天然防腐剂和酸味剂,广泛应用于腌制蔬菜、乳制品、肉制品和调味酱中;酒糟本身可作为发酵底物,生产高纯度乳酸等	[41-44]
多酚类物质	天然抗氧化剂、天然防腐剂	抗氧化:清除自由基,抑制脂质过氧化;抗菌:破坏病原菌(如金黄色葡萄球菌)细胞膜的完整性	作为天然抗氧化剂,用于高脂肪食品以延长保质期;作为功能性配料开发营养保健品	[10,37,41-42]

可显著提升白酒糟多糖的抗氧化能力,DPPH 自由基的 IC_{50} 值由 11.12 mg/mL 降至 9.80 mg/mL,ABTS 自由基的 IC_{50} 值由 156.21 mg/mL 降至 51.39 mg/mL。此外,白酒糟中提取的阿魏酰化寡糖(FOs)具有一定的抗氧化和抗炎活性,在 RAW264.7 细胞炎症模型中可抑制 $TNF-\alpha$ 、IL-6 和 IL-1 β 的分泌,并促进 IL-10 生成^[36]。作为非淀粉多糖,白酒糟多糖还具有益生元开发潜力,可被双歧杆菌、乳酸杆菌等肠道有益菌利用,促进其增殖并产生乙酸、丙酸、丁酸等短链脂肪酸(SCFAs),如乙酸、丙酸和丁酸^[37-38]。这些代谢产物能够调节结肠上皮细胞环境,降低肠道 pH,抑制部分有害菌生长,并参与免疫调节和炎症反应调控。研究^[39]表明,从白酒糟中获得的寡糖(AXOS/XOS)能显著促进有益菌增殖,且聚合度较高(DP>3)的寡糖在远端结肠仍具活性,可能产生较持久的肠道调节作用。因此,白酒糟多糖可作为抗氧化、免疫调节及益生元相关功能食品开发的候选原料。实际应用中,将白酒糟膳食纤维粉添加至面包、饼干等焙烤食品中,可提高产品膳食纤维含量,但其较高的吸水性及对面筋网络的干扰可能影响产品品质,通常需通过调整加水量、优化揉混工艺或添加活性面筋蛋白等方式进行改善^[40]。

3.3 有机酸类物质及其应用潜力

白酒糟中除含有多酚类物质外,还含有乳酸、乙酸等有机酸。研究^[41]表明,白酒糟中总酸含量可达 3.87 g/100 g,其水提液中乳酸质量浓度为 1.84 mg/mL。这些有机酸主要来源于残留碳水化合物在酿造和后续发酵过程中的微生物代谢,因此白酒糟也可作为有机酸发酵生产的潜在底物^[42-43]。有机酸的抑菌作用主要与降低体系 pH、影响细胞膜完整性等机制有关。已有研究^[44]显示,乳酸对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的最小抑菌质量浓度(MIC)为 0.100~0.375 g/100 mL。与多酚类物质相比,有机酸的抗氧化能力相对有限,但其在食品防腐和酸度调节方面具有应用价值。乳酸和乙酸作为常见食品酸度调节剂和防腐相关成分,已被广泛应用于乳制品、腌制蔬菜和肉制品等食品体系中,可用于调节风味并延长货架期^[44]。此外,白酒糟可经发酵制备酸味调味酒,也可通过水提结合分子蒸馏等方式将乳酸含量由 1.84 g/100 g 富集至 24.10 g/100 g,为规模化生产高纯度 L-乳酸提供低成本原料。

3.4 酚类物质及其应用潜力

研究^[37]表明,白酒糟多酚提取物可显著抑制脂质氧化,延长肉制品、沙拉酱、食用油和烘焙食品的货架期;纯化后的白酒糟多酚提取物表现出较好的 DPPH 自由基清除能力,其 IC_{50} 值为 34.03 μ g/mL。此外,阿魏酸等酚类活性成分在 LPS 诱导的巨噬细胞炎症模型中,可抑制 IL-6、iNOS 和 COX-2 的表达^[41],相关衍生物也表现出一定的抗菌活性,例如阿魏酸接枝壳聚糖对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有抑制作用,其最小抑菌质量浓度为 64 μ g/mL^[42]。

基于其抗氧化、抗炎和抗菌等活性,白酒糟多酚在食

品工业中可作为天然抗氧化剂或防腐辅助成分,用于延缓脂质氧化、抑制部分微生物生长,并改善食品贮藏稳定性。与亚硝酸盐等合成添加剂相比,白酒糟多酚具有天然来源和功能多样的特点,但其替代应用仍需结合具体食品体系、添加量、安全性及稳定性进行评价。在营养健康产品开发方面,阿魏酸等酚类成分被认为与心血管代谢调节相关,其中阿魏酸可通过影响 HMG-CoA 还原酶活性参与胆固醇合成调控^[42]。因此,白酒糟多酚在食品保鲜、功能性配料及营养健康产品开发中具有一定应用潜力。

4 结语及展望

随着对白酒糟组成和功能特性的认识不断加深,其资源化利用已由传统的饲料化、肥料化和能源化处理,逐步拓展至功能性成分提取、食品配料开发及生物基材料等方向。白酒糟中含有蛋白质、膳食纤维、多酚、有机酸等多类可利用组分,其含量和功能特性受原料、发酵方式及不同香型酿造工艺的影响。今后的研究可围绕分级利用和综合利用展开,构建适用于白酒糟特点的生物炼制路径,即优先回收生物活性肽、多糖、多酚等高附加值组分,再对残余蛋白、纤维及有机质进行食品化、饲料化、材料化或能源化利用,从而提升整体资源利用效率。理想的产业模式:第一阶段,采用温和的酶法或绿色溶剂技术,优先提取附加值最高的组分,如生物活性肽、功能性寡糖和高活性多酚,用于功能食品、保健品乃至医药领域。第二阶段,针对第一阶段提取后的残余物,可进一步分离回收蛋白质、膳食纤维等含量较高、适宜规模化利用的组分,用于食品强化剂、高蛋白饲料或生物基材料等产品开发。第三阶段,将最终的残渣通过厌氧发酵或好氧堆肥,转化为生物能源(沼气)和有机肥料,实现有机固废的零排放。这种分级综合利用模式可在提高资源利用效率的同时,提升白酒糟副产品的经济价值,并推动白酒产业向循环利用方向发展。然而,从实验室研究走向规模化工业生产,仍面临严峻挑战。未来的研究应聚焦于以下几个关键方向。

(1) 绿色高效技术的突破:开发成本更低、可循环使用的、专门针对白酒糟复杂基质的复合酶制剂;推动超临界流体萃取、亚临界水萃取等环境友好型技术从实验室走向工业化应用,降低生产过程的环境影响。

(2) 功能深挖与应用拓展:深入挖掘酒糟中未知或未充分研究的生物活性物质,并利用组学技术和临床试验系统评价其在调节肠道菌群、改善代谢综合征等方面的健康功效。同时,应用领域也可从食品拓展至化妆品(如抗衰老肽)、生物医药等更高价值的产业。

(3) 产业体系的构建:实现白酒糟的生物炼制不仅是技术问题,更是系统工程和商业模式的挑战。这需要建立稳定的酒糟收集、保鲜和运输物流体系;制定酒糟原料及其衍生产品的行业质量标准与应用规范;最重要的是,加强酿酒、食品、饲料、能源和化工等领域的跨行业合作,

构建一个共享利益、共担风险的产业生态系统。

综上,白酒糟并非单一废弃物,而是含有蛋白质、膳食纤维、多酚、有机酸等多种可利用成分的发酵副产物。围绕其功能性成分提取、活性评价和食品应用开展研究,有助于拓展白酒糟的高值化利用途径。未来仍需在绿色提取工艺、功能机制阐明、产品稳定性、安全性评价及规模化应用等方面进一步深入,以提升白酒糟资源利用水平,并为白酒产业绿色发展和食品功能配料开发提供支撑。

参考文献

- [1] YU H Y, XIE B T, KHAN R, et al. The changes in macronutrients and microbial community structure during the co-composting of white wine distillers grains and potassium silicate[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 319: 128681.
- [2] 付娜娜, 王亚美, 王方正, 等. 白酒糟资源化利用现状分析[J]. *中国酿造*, 2025, 44(8): 9-14.
FU N N, WANG Y M, WANG F Z, et al. Analysis of the current situation of resource utilization of Baijiu distiller's grains[J]. *China Brewing*, 2025, 44(8): 9-14.
- [3] 郭帅鹏, 王改琴, 徐瑞, 等. 酒糟的营养价值及其在畜禽生产中的应用[J]. *饲料工业*, 2025, 46(14): 14-19.
GUO S P, WANG G Q, XU R, et al. Nutrition value of distiller's grains and its application in livestock and poultry production[J]. *Feed Industry*, 2025, 46(14): 14-19.
- [4] 罗琳, 廖菲菲, 辛璇, 等. 黄酒糟蛋白质资源的开发利用研究进展[J]. *现代食品科技*, 2025, 41(5): 364-371.
LUO L, LIAO F F, XIN X, et al. Research progress of the development and utilization of protein resources in yellow wine lees[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2025, 41(5): 364-371.
- [5] 王慧丽, 沈雪梅, 陈影, 等. 基于不同原料的干酒糟及其可溶物(DDGS)饲用价值分析[J]. *安徽农学通报*, 2025, 31(9): 87-92.
WANG H L, SHEN X M, CHEN Y, et al. Analysis of feeding value of distillers dried grains with solubles (DDGS) derived from different raw materials[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2025, 31(9): 87-92.
- [6] HE R, YANG Y B, LI Y S, et al. Recent progress in distiller's grains: chemical compositions and biological activities[J]. *Molecules*, 2023, 28(22): 7492.
- [7] 陈宝, 范志勇, 王丽, 等. 白酒糟和发酵白酒糟的营养价值及其在猪生产中的应用研究进展[J]. *动物营养学报*, 2025, 37(5): 2822-2836.
CHEN B, FAN Z Y, WANG L, et al. Research progress on nutritional value of distiller's grains and fermented distiller's grains and their application in pig production[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2025, 37(5): 2822-2836.
- [8] 王建新. 酒糟高值化利用研究进展[J]. *食品安全导刊*, 2018(33): 160-161.
WANG J X. Research progress on high-value utilization of distillers' grains[J]. *Journal of Food Safety Guide*, 2018(33): 160-161.
- [9] LI X J, CHEN S T, YU Y, et al. Ethanol production from mixtures of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and corn[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 129: 59-66.
- [10] BHANJA DEY T, CHAKRABORTY S, JAIN K K, et al. Antioxidant phenolics and their microbial production by submerged and solid state fermentation process: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 53: 60-74.
- [11] 江思瑶, 宋昊, 陈晨, 等. 白酒酒糟中有机酸的分离提取及香气成分分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(17): 206-211.
JIANG S Y, SONG H, CHEN C, et al. Analysis of organic acids and flavoring compositions extracted from distiller's grains [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(17): 206-211.
- [12] 唐平, 山其木格, 王丽, 等. 白酒风味化学研究方法及其白酒风味化学研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(17): 315-324.
TANG P, SHAN Q M, WANG L, et al. A review of research methods in Baijiu flavor chemistry and recent progress in the flavor chemistry of Maotai-flavored Baijiu[J]. *Food Science*, 2020, 41(17): 315-324.
- [13] 岳小淋, 向双全, 钱宇, 等. 不同等级浓香型白酒基酒挥发性风味物质差异分析[J]. *中国酿造*, 2025, 44(6): 258-265.
YUE X L, XIANG S Q, QIAN Y, et al. Analysis on the difference of volatile flavor components in strong-flavor Baijiu base liquor with different grades[J]. *China Brewing*, 2025, 44(6): 258-265.
- [14] LI H H, ZHANG X, GAO X J, et al. Comparison of the aroma-active compounds and sensory characteristics of different grades of light-flavor Baijiu[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1238.
- [15] LI S P, LIANG J J, MA Y L, et al. Physicochemical properties of red millet: a novel Chinese rice wine brewing material[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(6): e15556.
- [16] 陈丽花, 陈少华, 荣玉芝, 等. 具有抗氧化活性青稞酒糟蛋白酶解液对 H₂O₂ 诱导 HepG2 细胞的保护作用[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(3): 28-38.
CHEN L H, CHEN S H, RONG Y Z, et al. H₂O₂-induced protective effects of the antioxidant protease hydrolysate of highland barley brewer's spent grains on HepG2 cells[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2024, 40(3): 28-38.
- [17] SUN H L, NI B, YANG J G, et al. Nitrogenous compounds and Chinese Baijiu: a review[J]. *Journal of the Institute of Brewing*, 2022, 128(1): 5-14.
- [18] SHAH U, DWIVEDI D, HACKETT M, et al. Physicochemical characterisation of kafirins extracted from sorghum grain and dried distillers grain with solubles related to their biomaterial functionality[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 15204.
- [19] CHATZIFRAGKOU A, PRABHAKUMARI P C, KOSIK O, et al. Extractability and characteristics of proteins deriving from wheat DDGS[J]. *Food Chemistry*, 2016, 198: 12-19.
- [20] 曾育婷, 胡思齐, 刘红芹, 等. 白酒、酒醅及丢糟中生物活性肽的研究进展[J]. *中国酿造*, 2025, 44(6): 1-7.
ZENG Y T, HU S Q, LIU H Q, et al. Progress in bioactive peptides in Baijiu, fermented grains and distiller's grains[J]. *China Brewing*, 2025, 44(6): 1-7.

- [21] CHEN L H, CHEN S H, RONG Y Z, et al. Identification and evaluation of antioxidant peptides from highland barley distiller's grains protein hydrolysate assisted by molecular docking[J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137441.
- [22] JIANG Y S, XING M Z, KANG Q, et al. Pulse electric field assisted process for extraction of Jiuzao glutelin extract and its physicochemical properties and biological activities investigation[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132304.
- [23] 张世仙, 从凯龙, 曾启华, 等. 酶法提取茅台酒糟中水溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 中国酿造, 2012, 31(3): 97-100.
- [24] ZHANG S X, CONG K L, ZENG Q H, et al. Extraction technology of water-soluble dietary fiber from Moutai vinasse by enzymatic extraction[J]. China Brewing, 2012, 31(3): 97-100.
- [24] 刘军, 顾向红, 徐昊, 等. 枸杞酒糟可溶性膳食纤维提取及其理化性质研究[J]. 河南农业科学, 2019, 48(8): 160-167.
- [24] LIU J, XIE X H, XU H, et al. Extraction and properties of soluble dietary fiber from Chinese wolfberry distiller's grains[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(8): 160-167.
- [25] HU H G, ZHAO Q L. Optimization extraction and functional properties of soluble dietary fiber from pineapple pomace obtained by shear homogenization-assisted extraction[J]. RSC Advances, 2018, 8(72): 41 117-41 130.
- [26] 常桂英, 于加平. 玉米酒糟中绿原酸提取工艺研究[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 298-300.
- [26] CHANG G Y, YU J P. Study on the extraction process of chlorogenic acid from corn distillers' grains[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(12): 298-300.
- [27] 芮文君, 赵萍, 邱悦, 等. 响应面法优化白酒糟富里酸的提取工艺[J]. 中国酿造, 2017, 36(9): 82-86.
- [27] RUI W J, ZHAO P, QIU Y, et al. Optimization of extraction technology of fulvic acid in distillers grains by response surface method[J]. China Brewing, 2017, 36(9): 82-86.
- [28] 曹新志, 游见明, 熊俐, 等. 郎酒酒糟中总酚的提取与检测方法的优化[J]. 中国酿造, 2011, 30(7): 137-140.
- [28] CAO X Z, YOU J M, XIONG L, et al. Optimization of extraction and detection methods of total phenol from Langjiu Liquor vinasse[J]. China Brewing, 2011, 30(7): 137-140.
- [29] IFTIKHAR M, ZHANG H J, IFTIKHAR A, et al. Study on optimization of ultrasonic assisted extraction of phenolic compounds from rye bran[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134: 110243.
- [30] HU S, ZHU S L, LUO J, et al. Effect of extrusion on physicochemical properties and antioxidant potential of protein isolate derived from Baijiu vinasse[J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132527.
- [31] WEI D, FAN W L, XU Y. Identification of water-soluble peptides in distilled spent grain and its angiotensin converting enzyme (ACE) inhibitory activity based on UPLC-Q-TOF-MS and proteomics analysis[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129521.
- [32] ZHANG L M, JIANG Y S, YIN Z T, et al. Isolation and evaluation of two angiotensin-I-converting enzyme inhibitory peptides from fermented grains (Jiupai) used in Chinese Baijiu production[J]. Rsc Advances, 2018, 8(65): 37 451-37 461.
- [33] LI C, HU Q N, LIANG Y Q, et al. Physicochemical properties and application in film preparation of prolamin from distiller's grains[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(8): 5 206-5 215.
- [34] 祖未希, 梁雅琪, 李晨. 白酒糟醇溶蛋白复合涂膜液对巨峰葡萄的保鲜效果[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(23): 70-76.
- [34] ZU W X, LIANG Y Q, LI C. Preservation effect of composite emulsion coating containing prolamin from Baijiu distiller's grains on kyoho grape[J]. Food Research and Development, 2022, 43(23): 70-76.
- [35] YIN Z T, LIU M Y, WANG B W, et al. Extraction, identification, and *in vitro* anti-inflammatory activity of feruloylated oligosaccharides from Baijiu distillers' grains[J]. Foods, 2024, 13(8): 1 283.
- [36] FANG H Y, CHEN Y K, CHEN H H, et al. Immunomodulatory effects of feruloylated oligosaccharides from rice bran[J]. Food Chemistry, 2012, 134(2): 836-840.
- [37] LIU Y Z, LI X, QIN H, et al. Obtaining non-digestible polysaccharides from distillers' grains of Chinese Baijiu after extrusion with enhanced antioxidation capability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 243: 124799.
- [38] MONTEAGUDO-MERA A, CHATZIFRAGKOU A, KOSIK O, et al. Evaluation of the prebiotic potential of arabinoxylans extracted from wheat distillers' dried grains with solubles (DDGS) and in-process samples[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(17): 7 577-7 587.
- [39] ROTH M, DÖRING C, JEKLE M, et al. Mechanisms behind distiller's grains impact on wheat dough and bread quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(2): 274-284.
- [40] KIM N H, PARK H J, LEE E H, et al. The inflammatory activity of purified-ferulic acid from *Tetragonia tetragonioides* [J]. Journal of Applied Biological Chemistry, 2019, 62(3): 239-246.
- [41] DASAGRANDE C, PARK S, JUNG W K, et al. Antibacterial and biofilm modulating potential of ferulic acid-grafted chitosan against human pathogenic bacteria[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(8): 2 157.
- [42] CUI K L, ZHANG L C, LA X Q, et al. Ferulic acid and P-Coumaric acid synergistically attenuate non-alcoholic fatty liver disease through HDAC1/PPARG-mediated free fatty acid uptake[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(23): 15297.
- [43] SANAM M, DETHA A, ROHI N. Detection of antibacterial activity of lactic acid bacteria, isolated from Sumba mare's milk, against *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, and *Escherichia coli*[J]. Journal of Advanced Veterinary and Animal Research, 2022, 9(1): 53.
- [44] FRESTEDT J L. Foods, food additives, and generally regarded as safe (GRAS) food assessments[J]. Food Control and Biosecurity, 2018, 16: 543-565.