

白酒酿造副产物综合利用研究进展

徐浩^{1,2}, 夏序春³, 江友峰^{1,2}, 熊慧欣^{1,2}, 吴未^{1,2}, 刘东^{1,2}, 朱霞⁴, 王晓丹^{3*}

(1. 贵州茅台酒厂(集团)循环经济产业投资开发有限公司, 贵州 遵义 564500; 2. 贵州省白酒制造业创新中心, 贵州 遵义 564500; 3. 贵州大学 酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025; 4. 贵州省生物技术研究开发基地有限公司, 贵州 贵阳 550014)

摘要:我国每年白酒的产量巨大,在白酒酿造过程中,会产生酒糟、黄水、污泥和稻草等副产物。这些副产物若不加以利用,不仅容易造成环境污染,还会造成资源浪费。白酒酿造副产物含有一定的营养成分和活性成分,对其进行综合利用,可提高资源利用效率。该文总结了白酒酿造副产物(酒糟、黄水、窖泥、稻草和锅底水)的特性及利用价值,并综述了上述白酒酿造副产物综合利用研究现状,旨在为白酒酿造副产物综合利用研究提供参考,提高酿造副产物的资源转化效率和高值化利用程度。

关键词: 酿造; 副产物; 白酒; 酒糟; 黄水; 窖泥; 稻草; 锅底水; 综合利用

中图分类号: TS261.9

文章编号: 0254-5071(2025)10-0011-06

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.10.002

引文格式: 徐浩, 夏序春, 江友峰, 等. 白酒酿造副产物综合利用研究进展[J]. 中国酿造, 2025, 44(10): 11-16.

Research progress on comprehensive utilization of Baijiu brewing by-products

XU Hao^{1,2}, XIA Xuchun³, JIANG Youfeng^{1,2}, XIONG Huixin^{1,2}, WU Wei^{1,2}, LIU Dong^{1,2}, ZHU Xia⁴, WANG Xiaodan^{3*}

(1. Kweichow Moutai Distillery (Group) Circular Economy Industry Investment Development Co., Ltd., Zunyi 564500, China;

2. Baijiu Manufacturing Innovation Center of Guizhou Province, Zunyi 564500, China; 3. School of Brewing and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Guizhou Biotechnology Research and Development Base Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract: The Baijiu output in China is huge every year. In the Baijiu brewing process, by-products such as distillers' grains, Huangshui, mud and straw are produced. If these by-products are not utilized, they will not only easily cause environmental pollution but also lead to resources waste. These Baijiu brewing by-products contain certain nutrients and active ingredients, comprehensive utilization of them can improve the efficiency of resource utilization. The characteristics and utilization value of Baijiu brewing by-products (distillers' grains, Huangshui, pit mud, straw and pot bottom water) were summarized, and the research status of comprehensive utilization for the by-products was reviewed, aiming to provide a reference for the research on comprehensive utilization of Baijiu brewing by-products and improve the resource conversion efficiency and high-value utilization degree of brewing by-products.

Key words: brewing; by-product; Baijiu; distillers' grains; Huangshui; pit mud; straw; pot bottom water; comprehensive utilization

白酒以高粱、小麦和大米等粮谷为主要原料,添加大曲、小曲或麸曲等作为糖化发酵剂,经过蒸煮、糖化、发酵、蒸馏、陈酿、勾调制作而成^[1]。《中国酒业“十四五”发展指导意见》显示,在产业经济目标上,白酒行业产量800万kL,比“十三五”末增长8.0%,年均递增1.6%^[2]。白酒行业发展迅速,导致酒糟、污泥、稻草、酿酒废水等副产物大量产生,利用高粱固态法生产1 t白酒,将产生湿酒糟约3~4 t^[3],还会排出12~20 t的酿酒废水,其中,有机质含量高的黄水为300~400 kg,若将这些酿酒废水直接排放将带来严重的环境污染^[4-5]。近年来,伴随科技进步与环保意识增强,将酒糟、黄水、窖泥等酿造副产物应用于饲料、肥料、生物燃料、生物活性成分提取等方面,提升资源利用效率,助力白酒酿造行业绿色生产^[6]。

本文总结了常见酿造副产物(酒糟、黄水、窖泥、稻草和锅底水)的特性及利用价值,详细阐述其在饲料、肥料、生物燃料、生物活性成分提取等领域的应用研究现状,深入剖析当前研究中存在的问题,并对未来发展趋势进行展望,以期为推动酿造副产物资源化利用技术的创新与产业发展提供参考,助力白酒酿造行业向绿色、可持续方向转型升级。

1 白酒酿造副产物的特性及利用价值

1.1 酒糟的特性及利用价值

酒糟是白酒酿造过程中产生的主要固体副产物,又称为丢糟,是酿造环节后剩余的固体物质。酒糟具有水分和有机质含量高、酸度高、极易发生霉变等特性,不易转移和运输,长时间露天堆积将对周围环境造成污染^[7]。酒糟的

收稿日期: 2025-02-06

修回日期: 2025-05-30

基金项目: 有机肥功能菌应用研究(H2021180); 酒糟窖底水转液态饲料技术研发(K22-0115-027); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才-GCC[2023]013); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才-CXTD[2023]029)

作者简介: 徐浩(1997-),男,助理工程师,硕士,研究方向为酒糟资源化利用。

*通讯作者: 王晓丹(1980-),女,正高级实验师,博士,研究方向为应用生物技术。

成分和理化性质与酿造工艺、粮食种类和贮存时间等因素密切相关^[8],不同香型鲜酒糟中水分含量存在差异,酱香型、浓香型鲜酒糟水分含量分别为48.40%~55.42%、58.42%,清香型和芝麻香型鲜酒糟水分含量相对较高,分别为61.05%和58.0%~61.03%。不同香型白酒酒糟的理化指标检测结果(以干基计)见表1。由表1可知,不同香型白酒糟中均含有粗蛋白、粗纤维、粗淀粉等营养成分,其不仅来自于谷物糖化和发酵,还来自酿造微生物及其新陈代谢产物和菌体自溶物^[9],这些成分为酒糟的资源化利用提供了坚实基础。除表1中的成分外,酒糟中还含有丰富的黄酮类、酚酸类、多糖、多肽等活性成分以及芳香物质等^[10]。酒糟中含有淀粉、蛋白质、脂肪和氨基酸等物质,在畜牧养殖领域可将其作为饲料直接饲喂或作为发酵饲料的原料;含有多种矿物元素和有益微生物,在农业生产中经处理后可作为有机肥料改善土壤;含有丰富的有机质,在生物质能源开发等领域,也具备一定的潜在利用价值。

表1 不同香型白酒糟理化指标检测结果
Table 1 Determination results of physicochemical indexes of different flavor types Baijiu distiller's grains

项目	酱香型 ^[11-13]	浓香型 ^[11-13]	清香型 ^[9,14]	芝麻香型 ^[12,15]
淀粉/%	8.62~12.20	12.68~13.68	8.52~9.40	10.4~11.4
粗蛋白/%	18.23~28.68	16.01~29.69	13.96~22.7	23.31
粗脂肪/%	2.88~7.95	4.83~9.62	4.27~10.81	7.64
粗纤维/%	17.12~28.61	27.32~34.52	10.39~31.50	28.05
粗灰分/%	10.13~14.44	8.91~14.85	5.60~11.68	11.75
钙/%	0.58~1.74	0.32~0.46	0.26~0.5	-
总磷/%	0.31~0.59	0.19~0.32	0.25~0.37	-

1.2 黄水的特性及利用价值

白酒酿造过程中产生的黄水,是一种棕褐色的粘稠液体,又称黄浆水或者窖底水,包括平地发酵黄水和窖池发酵黄水(窖底黄水),来自自由糟醅中未被微生物利用的过饱和水和微生物代谢产生的水,溶解糟醅中可溶性淀粉、单宁、酸、还原糖和酵母溶出物等物质,不断沉积于窖池底部而产生^[16],黄水的产量与糟醅的初始含水量呈正相关^[17]。黄水是一种多元组分的液体,具有高酸度、高化学需氧量(chemical oxygen demand,COD)及生化需氧量(biochemical oxygen demand,BOD)的特性^[18],若不加处理及利用,随意排放,将会造成严重的环境污染和资源的浪费。

黄水酒精度为3.2%vol~7.33%vol,总酸含量为21.41~38 g/L,总糖含量为11.15~54 g/L,总酯含量为1.3~2.7 g/L,pH值为2.9~3.8,总氮含量为0.27%~0.35%,淀粉含量为2.1%~4.4%,还原糖含量为1.82%~4.7%,单宁及色素含量为0.13%~0.23%^[19-21]。此外,黄水中存在大量的风味化合物,以酯类(43.58%~58.54%)、醇类(15.68%~31.58%)和酸类(18.81%~24.48%)为主^[22]。其中,酸类物质主要来自微生物

代谢和发酵酒醅中的有机酸,包括以乳酸为主的非挥发性有机酸和乙酸、丁酸、己酸、丙酸等挥发性有机酸^[22],且其有机酸的含量是白酒酿造中其他液体副产物(如酒尾、锅底水、尾水等)的100多倍^[23]。同时,黄水中的氨基酸成分丰富,其亮氨酸、丙氨酸、缬氨酸、酪氨酸、丝氨酸的含量相对突出^[24]。

黄水不仅是风味物质积累的重要载体,更蕴藏着丰富的微生物资源。唐艳平等^[25]对黄水中原核微生物组成的研究表明,乳酸杆菌属(*Lactobacillus*)、魏斯氏菌属(*Weissella*)、肠球菌属(*Enterococcus*)、副拟杆菌属(*Parabacteroides*)、假交替单胞菌属(*Pseudoalteromonas*)、发酵单胞菌属(*Fermentimonas*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)和氨基酸杆状菌属(*Aminobacterium*)是黄水中的优势菌属,其中乳酸杆菌属是黄水中绝对优势菌属,被认为是白酒发酵过程中的核心原核微生物^[26]。黄水真菌菌群结构研究表明,哈萨克斯坦酵母属(*Kazachstania*)、曲霉属(*Aspergillus*)和嗜热子囊菌属(*Thermoascus*)是黄水中的优势真菌属,子囊菌门(Ascomycota)是黄水的绝对优势菌门^[27]。黄水中这些丰富微生物,可代谢产生醇、酸、酯和醛酮等风味物质或风味前体物质,在提高白酒的风味和质量方面起到重要作用^[28],黄水具有制备酯化液、提取活性成分和芳香物质等利用价值,对其二次利用于白酒酿造过程中养窖、制曲等环节提供重要基础。

1.3 窖泥的特性及利用价值

窖泥可应用于浓香型、酱香型、芝麻香型、特香型白酒酿造过程,窖泥质量是影响白酒风味的重要因素^[29],不合理的培养制作、发酵过程中的老化以及养护不当等都会造成窖泥质量下降,因质量退化、窖泥霉变、糟醅和谷壳过多等原因使窖泥无法再次使用^[30],废弃的窖泥成为白酒酿造过程中副产物之一。

有机质、铵态氮、有效磷和有效钾含量是土壤肥力的评价指标^[31],其在窖泥中亦有检出。吴浪涛等^[32]研究表明,10年窖泥中和30年窖泥中铵态氮含量分别为0.91~1.10 g/kg、1.04~1.45 g/kg,10年窖泥有效磷和有效钾含量分别为0.88~1.21 g/kg、0.78~0.88 g/kg,30年窖泥中有效磷和有效钾含量分别为1.46~1.87 g/kg、1.10~1.20 g/kg。土壤腐殖质作为土壤的一种有机质,在保持土壤肥力与结构方面起着重要的作用。在白酒酿造过程中,进入窖泥的糟醅、稻壳等物质通过微生物的作用合成腐殖质,窖泥中腐殖质含量为4.90%~15.98%^[33]。因此,废弃窖泥在堆肥利用和返土增肥方面具有潜在的利用价值。

1.4 稻草的特性及利用价值

稻草是白酒大曲发酵过程中必不可少的辅料,主要起到保温、隔离曲块、调节水分和接种微生物的作用^[34]。大曲发酵过程中,部分稻草会因霉变、吸水过多等原因不能继

续使用,仓内发酵结束后,长度不够、发黑、异味的稻草也会被集中丢弃,制曲废弃稻草由此产生^[35]。由于直接接触曲块,这类废弃稻草可能会残留少量制曲原料麦粉,且富集了大量与白酒酿造相关的微生物,因此在制曲培养液制备、晾堂养护等酿造环节中仍具备一定的利用价值。此外,杂质较少,纤维结构相对完整,具有一定的韧性和透气性的制曲稻草,还适合在好氧堆肥中生产肥料作为载体或基质使用。

1.5 锅底水的特性及利用价值

锅底水是指在蒸粮或蒸酒过程中甑锅底部的水,属于典型的高浓度有机废水。其成分复杂,一方面源于蒸酒过程中有一部分糟醅及有机质从甑内漏入底锅;另一方面,生产中常向底锅中加入黄水、酒尾等酿酒副产物进行蒸馏回收,使得锅底水含有大量的酸类、酯类及固形物,还包括少量的醛类、醇类等物质^[36],直接导致其COD、BOD、氨氮、总磷、总氮浓度相对较高^[37],远超过国家允许的废水排放标准,必须经再次利用或无害化处理后才能排放。从资源化利用角度看,经过厌氧发酵、好氧处理等工艺转化后,可制成有机肥;凭借高有机物含量,使其适合厌氧消化产生沼气;部分成分还可用于培养微生物或提取生物活性物质。

2 酿酒副产物的综合利用现状

2.1 酒糟的综合利用现状

2.1.1 肥料化利用

酒糟中不仅含有大量未被完全利用的有机质以及粗蛋白、粗纤维、粗淀粉、氨基酸等营养成分,还包含钙、磷、钾等多种矿物质。这些物质在土壤中经微生物分解后,可转化为植物易于吸收的养分,为作物生长提供营养支持^[13]。白酒酒糟主要有干燥粉碎后直接还田、堆肥还田以及制作酒糟有机肥等肥料利用途径。作为一种优质的有机肥生产原料,酒糟可以通过添加功能菌剂、搭配辅料与其他物料混合堆肥等手段缩短堆肥时间、加快腐熟进程、提高有机肥的品质和功效^[8]。吴耀领等^[38]将废弃酒糟中筛选到3株纤维素降解菌制备成复合菌剂添加至酒糟中进行堆肥功能验证,结果表明,3株复合菌株接种量为0.8%、1.0%时,酒糟中的纤维素分别降解34.8%和37.0%(对照组纤维素降解18.0%),酒糟T值(堆肥终点C/N与初始C/N的比值)分别降低至0.62和0.61(对照组T值降至0.76),具有促进酒糟堆肥腐熟和缩短堆肥周期的作用。刘林培等^[39]以白酒丢糟和食用菌菌渣为原料进行共堆肥实验,堆肥结束时,硝态氮、有机氮和总氮的含量相对堆肥初始时均得到提高,堆体有机质降解率达8.06%,堆体的T值为0.68,达到完全腐熟标准。酒糟有机肥生产研究已经较为成熟,酒糟有机肥已应用于油菜^[40]、高粱^[41]、茶叶^[42]等作物种植,具有促进作物生长、提高作物产量和品质等作用。

2.1.2 饲料化利用

酒糟中含有粗淀粉、粗蛋白、粗脂肪、维生素和微量元素等营养物质,可作为饲料用于禽畜喂养,但酒糟酸度高、湿料含有乙醇,且不易被动物消化的纤维素和半纤维素含量高,因此不能完全替代饲料。酒糟饲料化利用可以通过按适当比例添加到现有饲料中、微生物发酵生产饲料^[43]、混合青贮发酵等方法来实现。将酒糟与其他物料混合青贮可以提高青贮发酵品质和青贮饲料营养价值,当前与酒糟混合青贮的使用的原料包括巨菌草^[44]、芭蕉叶^[45]、花生秧^[46]、玉米秸秆和稻草秸秆^[47]等。

2.1.3 基料化利用

酒糟含有丰富的有机质可以提供良好的物质来源,是食用菌良好的栽培原料,经预处理后加入适量辅料配制培养基,适用于多种食用菌栽培,作为培养基使用后还可在堆肥中再次利用^[39]。酒糟作为菌种培养基已在金针菇、平菇、杏鲍菇、鸡腿菇、茶树菇等多种食用种植中开展应用^[48]。

2.1.4 能源化利用

酒糟可替代化石资源作为燃料和原料直接燃烧,是一种酒糟处理的高效快捷途径,其燃烧产生的热能可用于产生蒸汽和发电。酒糟中主要含有粗纤维、粗脂肪、粗蛋白及淀粉等成分,是一种生物质能载体,酒糟与煤掺混可以改善煤的燃烧特性,促进煤粉的着火与燃尽^[49]。酒糟经过微生物处理,可以形成乙醇、沼气等生物燃料,谢彤彤等^[50]以酱酒白丢糟为原料,研究其厌氧发酵产甲烷特性,结果表明,在发酵30 d和50 d时,甲烷产量分别为287 mL/g和360 mL/g。

2.1.5 功能性成分提取

酒糟中含有功能性低聚糖、风味物质、蛋白质及氨基酸类物质、抗氧化酚类及黄酮类物质及膳食纤维等功能性成分^[51],江思瑶等^[16]利用水提取、膜处理技术处理酱香酒糟提取有机酸(主要是乳酸)和香气成分,并用分子蒸馏技术实现乳酸的分离,馏出物中乳酸含量达24.1%。姜云松等^[52]利用超声辅助碱提酸沉淀法对酒糟中的蛋白质进行提取,随后对酒糟蛋白进行酶解得到肽提取液,对肽提取液进行分离、纯化和鉴定后,获得4种酒糟蛋白肽。

2.2 黄水的综合利用现状

2.2.1 黄水在白酒酿造环节中二次利用

黄水中含有丰富的白酒酿造相关的微生物资源,以及醇、醛、酸、酯类等风味成分和营养成分。可应用于窖池养护、制作人工窖泥、二次发酵、生产强化酒曲以及酯化液。黄水中的酿造功能微生物接种于窖泥中,同时营养物质随黄水进入到窖泥内部,在保证窖池湿度的同时为窖泥内部的微生物提供营养物质,从而达到窖池养护的目的^[53]。制作人工窖泥时,黄水可作为人工窖泥制作过程中的辅料,

起到接种微生物、调节水分和酸度、提供菌种生长因子、窖泥增香等作用^[54]。用于酒醅二次发酵时,黄水可促进酯化作用和有机酸的生成。王莉等^[19]研究表明,在浓香型白酒发酵后期酒醅的顶部渗入不同量的黄水,随着黄水添加量的增加,有机酸及乙醛、乙缩醛、乳酸乙酯、己酸乙酯及乙酸乙酯的生成量均增加。添加适量黄水可提高大曲品质,简晓平^[55]将含4.5%黄水的制曲用水用于小麦润粮,并配合丢糟生产大曲,展现出良好应用前景。李武龙等^[56]则利用黄水中富含有机酸和各种营养物质的特性,在浓香麸曲制备中添加黄水,以调节制曲麸皮初始酸度并补充营养。生产酯化液方面,酯化液是通过酯化酶技术使有机酸和醇生成的酯类物质,可提高白酒优质品率,而黄水因富含营养和有机酸、醇、酯等风味物质,是生产酯化液的优质原料^[53],将黄水酯化液与酒醅进行串蒸提升产酒品质,或经萃取后加入酒中使酒体更柔和、协调^[57-58]。另外,黄水酯化液还可用于养窖、护窖,以提升窖泥和原酒质量与口感,同时提高原酒产量,降低生产成本^[59]。

2.2.2 黄水在食醋和酱油生产中的应用

黄水中含有丰富的营养物质,乳酸、醋酸等酸类成分,具有与食醋香气成分含量相似的香味物质,是酿造食醋及酱油的优质原料^[4]。王永伟等^[60]利用微生物对黄水进行生物转化制备黄水转化液,黄水转化液与米酒混合后接种巴氏醋杆菌(*Acetobacter pasteurianus*)固体有氧发酵制醋,产品无刺激酸味,醇厚酿香,酸味适中柔和,且安全性较高。郭璟^[61]通过超临界CO₂流体技术制备黄水萃取液,利用黄水萃取液生产酱油能达到特级酿造酱油国家标准。李家民^[62]以预处理后黄水为主要原料,对小麦、黄豆和麸皮处理后加入酱香型白酒大曲和米曲霉、黑曲霉进行发酵制作固态酱醅,按特定的工艺生产酱油,产品能达到3级酱油标准,实现了黄水有效利用。

2.2.3 黄水在多糖提取中的应用

近几年关于黄水多糖的分离纯化、结构表征以及生物活性的研究增多,黄水多糖及相关产品的开发也成为了黄水资源化利用的新途径^[63]。杨娇等^[64]从黄水中分离、纯化得到一种有 α -吡喃糖苷骨架的酸性多糖(HSP-3),具有促进乳酸菌生长功能。LIM等^[65]从黄水中分离纯化得到3种黄水多糖(HSP40-0、HSP60-0和HSP80-0),HSP40-0和HSP80-0都可以显著增加肠道菌群拟杆菌门(*Bacteroidota*)的相对丰度,而HSP60-0可以增加考拉杆菌属(*Phascolarctobacterium*)的相对丰度,且其与肠道微生物群的发酵产物可以减轻脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)诱导的炎症,有益肠道健康。

2.2.4 黄水在农作物栽培中的应用

黄水经过变温工艺、酶解、干燥等工艺处理后制得的固体粉末含有丰富的营养成分,加入辅料后可作为食用菌

的培养基质,可以有效提高培养的食用菌的产量,且缩短培养周期、降低生产成本^[66]。黄水提取风味成分是其资源化利用的渠道之一,风味成分提取过后还含有大量营养物质,剩余的黄水母液配制成培养基,可用于食用菌的栽培^[67]。袁华冠^[68]将稀释20倍的黄水施用在3种蔬菜(菠菜、青菜、茼蒿)和3种粮食(大豆、高粱、玉米)后可以起到促进生长、提高农作物品质和增加产量的效果,并且能显著提高土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量。

2.3 窖泥的综合利用现状

由于窖泥本身材质的特殊性,废弃窖泥的资源化综合利用研究较少,目前主要集中在以下3个方面。①作肥料利用:李小杰等^[69]以白酒丢糟和废弃窖泥作为主要原料接种复合发酵菌剂制作生物有机肥,具有一定的经济和社会效益。王莉等^[70]利用酒糟、废弃窖泥和废弃稻草为原料腐熟发酵制作有机肥,可促进高粱、小麦和白菜种子发芽。②建筑材料利用:杨帆等^[71]以废弃窖泥、污泥、硅酸钠、生石灰和水为原料制备成建材领域常用的陶粒材料。蒋黔湘等^[72]用废弃窖泥和矿渣粉、水泥等制备出材料强度高,耐久性与力学性能好的生土建筑材料。③作燃料利用:余朝静等^[73]将干燥后废弃酒糟和粉碎后的废弃窖泥制备颗粒燃料。

2.4 制曲稻草的综合利用现状

部分制曲稻草能够投入下一轮制曲生产中继续使用,但仍然会产生一些废弃稻草。部分制曲废弃稻草中含有与成品大曲相似的微生物和风味物质组分,可应用到酿造生产或环境中。聂正东^[74]利用制曲废弃稻草与成品大曲加水混合制成制曲培养液应用到大曲发酵过程中,大曲品质显著提高。窖期晾堂会滋生大量与生产无关的微生物甚至有害菌,制曲废弃稻草可用于酿造车间的晾堂养护,可以避免杂菌的大量滋生,同时接种了制酒有益菌^[75],但目前有关的试验研究较少,实施效果有待探究。此外,制曲废弃稻草可以参考稻草资源化利用的方式,返土增肥或应用到酒糟堆肥、动物粪便堆肥、餐厨垃圾堆肥^[76]等好氧堆肥中生产肥料,以及利用厌氧消化技术生产沼气^[77]等。

2.5 锅底水的综合利用现状

锅底水能在酿造环节中再次利用,梁萌等^[78]利用锅底水、大曲粉、窖泥培养液按照2:1:2的比例搅拌均匀制成窖池养护液,改善了窖池水分、pH、有效氮、磷、钾、腐植酸、微生物等各项指标,达到了窖池养护的目的,并对原酒质量提升产生了积极的影响。底锅水具有高有机质、COD和BOD的特性,满足沼气发酵的关键条件,熊诚等^[79]利用厌氧生物技术处理酱香型酿造过程中的锅底水和窖底水,当二者按5:1的体积比混合,COD去处率可达91.7%,且在pH值为7左右时高温厌氧产甲烷最好,24 h内累计产气量为1 405 mL,产气率达1.41 m³/kg COD。微藻是一种光合自养的微生物,可以吸收酿酒废水中的营养元素并将其转

化为微藻生物质,获得的微藻生物质可应用于生物燃料、动物饲料、生物肥料的等高价值产品的生产中^[9]。利用微藻处理酿酒废水已展示出一些研究成果,在锅底水处理方面具有巨大潜力。

3 总结与展望

本文总结了白酒酿造副产物(酒糟、黄水、窖泥、稻草和锅底水)的特性及利用价值,总结了白酒酿造副产物已有综合利用方法。目前,酒糟肥料化利用或饲料化利用的技术成熟,经济效益和社会效益高,并已经开展了一定规模的应用实践,且相对于其他技术,对酒糟的处理和利用更为彻底。黄水的回收利用在白酒酿造环节中二次利用比较多,虽然一定程度上进行了资源回收利用,但利用率不高,存在二次残余,未来可以考虑以活性成分提取和生产沼气为研究重点。微生物发酵技术在酿造副产物处理中具有广泛的应用,未来可以加强高耐受能力和高转化率优良菌株选育、有效成分分离纯化技术等方面的研究,以进一步提高酿造副产物的资源转化效率和高值化利用程度。

参考文献:

- [1] 孙宝国,黄明泉,王娟.白酒风味化学与健康功效研究进展[J].中国食品学报,2021,21(5):1-13.
- [2] 杨宏辉.宋书玉理事长解读《中国酒业“十四五”发展指导意见》[J].中外酒业,2021(9):1-8.
- [3] 范文来.饮料酒副产物生物炼制综述[J].酿酒,2022,49(1):5-11.
- [4] 杨文鹏,王晓丹,蒋文,等.酱香型白酒副产物酒糟窖底水综合利用的研究进展[J].中国酿造,2024,43(3):6-12.
- [5] 李蓓遥,苏建,孙铜,等.酿酒废水底锅水水质和有机组分的检测分析[J].酿酒科技,2024(4):112-121.
- [6] 贵州省赤水河流域酱香型白酒生产环境保护条例[N].贵州日报,2022-12-19(006).
- [7] 李欣.酱香型白酒酒糟资源化利用分析研究[J].酿酒科技,2023(8):128-131.
- [8] 唐哲仁,高勇,师雄,等.白酒酒糟资源化利用技术研究进展[J].中国酿造,2024,43(8):13-19.
- [9] 张飞,程润喜,李钢平,等.白酒糟类原料营养解析及质量影响因素[J].中国饲料,2024(21):162-167,174.
- [10] 杨杰.酒糟中黄酮类化合物的提取分离及其生物活性研究[D].合肥:安徽农业大学,2022.
- [11] 李倩,裴朝曦,王之盛,等.不同类型酒糟营养成分组成差异的比较研究[J].动物营养学报,2018,30(6):2369-2376.
- [12] 谭高明,解竞静,叶晓梦,等.化学成分对干白酒糟肉鸡代谢能的影响及其估测模型的研究[J].动物营养学报,2024,36(9):5682-5692.
- [13] 陈照静.黔酒主要香型白酒酿造酒糟风味资源化研究应用[D].贵阳:贵州大学,2022.
- [14] 王璐.基于汾酒酒糟发酵的生物有机肥制备及其肥效研究[D].太原:山西大学,2023.
- [15] 时伟,陈叶,彭铭烨,等.多菌种发酵芝麻香型丢糟生产饲料的工艺条件优化[J].饲料工业,2024,45(11):69-75.
- [16] 谢旭,黄永军,洪胜,等.黄水形成及其对酒醅风味物质影响的研究[J].酿酒,2019,46(4):20-23.
- [17] 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 Sci Biotechnol**, 2025, 34: 665-675.
- [18] 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.
- [19] 王莉,袁宁,管桂坤,等.黄水对浓香型白酒酒质的影响[J].酿酒科技,2020(10):83-86.
- [20] 徐传鸿,余有贵,张文武.黄水的理化分析及其应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2014,5(12):4011-4017.
- [21] 李骐,相里加雄,翟旭龙,等.清香型白酒黄水物质分析及收集黄水对生产的影响研究[J].酿酒科技,2023(3):88-91.
- [22] GUO Q Y, ZHAO J J, PENG J B, et al. Revealing the flavor compositions, microbial diversity, and biological functions of Huangshui from different production workshops[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2024, 207: 116683.
- [23] 马彦超,侯雅馨,黄明泉,等.白酒工业副产物作为生物质资源的研究利用现状与前景[J].食品与发酵工业,2022,48(21):292-306.
- [24] 陈丹丹,曾燕凤,盛望龙,等.基于小分子化学成分的黄水资源再利用研究[J].绿色科技,2024,26(6):225-229,235.
- [25] 唐艳平,高秀兵,倪婕,等.白酒发酵副产物黄水原核微生物组成及理化特性研究[J].中国酿造,2024,43(3):72-78.
- [26] JIAO W J, XIE F, GAO L, et al. Identification of core microbiota in the fermented grains of a Chinese strong-flavor liquor from Sichuan[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2022, 158: 113140.
- [27] 刘凯,王菁,张玲.不同窖池黄水真菌菌群多样性及功能预测分析[J].中国酿造,2024,43(12):249-254.
- [28] GAO L, XIE F, REN X, et al. Correlation between microbial diversity and flavor metabolism in Huangshui: A by-product of solid-state fermentation *Baijiu*[J]. **LWT-Food Sci Technol**, 2023, 181: 114767.
- [29] 海超.浅析窖泥老化的原因及预防措施[J].酿酒,2021,48(5):111-114.
- [30] 谭宏,刘盛,何小龙,等.茅台镇酱香型白酒生产工艺中封窖泥循环使用率的研究[J].酿酒科技,2016(4):74-76.
- [31] 谢嘉霖,林传辉,欧阳童亮. ASI法同时测定无土栽培基质中有效磷和有效钾的含量[J].江苏农业科学,2014,42(4):245-248.
- [32] 吴浪涛,丁文骏,谢专,等.不同时期窖泥理化因子、风味物质和细菌组成的相关性[J].微生物学通报,2022,49(3):1030-1047.
- [33] 彭奎,余航,王超凯,等.不同质量浓香型白酒窖泥腐殖质组分的研究分析[J].食品与发酵科技,2022,58(3):124-128.
- [34] 涂昌华,汪地强,吉小超,等.大曲酱香型白酒生产中辅料的应用研究[J].酿酒科技,2019(8):72-74.
- [35] 范奇高,黎露露,骆红波,等.白酒酿造副产物的资源化利用技术研究进展[J].中国酿造,2023,42(9):1-6.
- [36] 宋攀,刘森,林锋,等.全产业链模式下白酒副产物的高效利用技术探讨[J].酿酒科技,2021(7):95-101.
- [37] 王远桃,张光利,何晓芬,等.赤水河流域酱酒企业酿造过程中产污水的特征研究[J].酿酒科技,2024(8):91-96.
- [38] 吴耀领,席晓黎,曾祥炼,等.酒糟纤维素降解菌的分离及其堆肥应用[J].河南农业科学,2022,51(1):79-88.
- [39] 刘林培,管秀琼,王洪,等.食用菌菌渣和白酒丢糟共堆肥过程中氮素变化及腐熟进程[J].食品与发酵工业,2020,46(21):188-194.
- [40] 杨红军,王小勤,苏坤杰,等.酒糟有机肥配施化肥对油菜产量及肥

- 料利用效率的影响[J]. 南方农业, 2024, 18(17): 101-105.
- [41] 胡伟, 魏全全, 苟久兰, 等. 酒糟发酵有机肥对酒用高粱生长及养分吸收的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(12): 33-40.
- [42] 胡伟, 张萌, 苟久兰, 等. 酒糟有机肥连续施用对湄潭翠芽茶叶生物效应的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(S1): 268-274.
- [43] 范恩帝, 蒋梦迎, 冯敏雪, 等. 混菌发酵白酒糟生产含功能成分饲料发酵条件的优化[J]. 生物技术通报, 2021, 37(12): 91-103.
- [44] 陈冬梅, 韦毅, 陈耀, 等. 巨菌草与无糠壳高粱白酒糟混合青贮品质及营养成分变化[J]. 饲料研究, 2021, 44(2): 85-88.
- [45] 赵圆圆, 樊雪莹, 成启明, 等. 不同混合比例茅台酒糟与芭蕉叶对其青贮饲料营养品质、发酵品质和微生物群落的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(2): 1340-1349.
- [46] 王佳楚男, 朱欣, 樊雪莹, 等. 不同比例花生秧与茅台酒糟混合青贮对饲料养分含量、发酵品质及微生物群落的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(6): 247-252.
- [47] 樊雪莹. 茅台酒糟保存及与秸秆混合青贮技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [48] 任羽, 王松, 王涛. 酒糟栽培食用菌研究现状[J]. 中国酿造, 2017, 36(3): 5-9.
- [49] 许丹霞. 煤与酒糟/污泥混燃特性的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [50] 谢彤彤, 孙晓娇, 吴凯旋, 等. 酱酒丢糟沼气发酵特性及微生物群落特征[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(5): 1311-1317.
- [51] 徐浩, 江友峰, 谭洪伟, 等. 酒糟中功能性成分综合利用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(18): 391-400.
- [52] 姜云松. 白酒酒糟中功能性多肽的提取纯化鉴定及活性测定[D]. 北京: 北京工商大学, 2020.
- [53] 车路萍, 陈垚, 黄朝兵, 等. 浓香型白酒酿造废水回收利用研究进展[J]. 中国酿造, 2023, 42(3): 18-22.
- [54] 靳喜庆, 冯亮, 张无疾, 等. 白酒人工窖泥培养方法研究进展[J]. 中国酿造, 2024, 43(7): 7-13.
- [55] 简晓平. 黄水丢糟制曲初步研究[J]. 酿酒科技, 2014(11): 81-83.
- [56] 李武龙, 卫春会, 黄治国, 等. 黄水添加量对浓香麸曲质量的影响研究[J]. 酿酒科技, 2024(7): 87-91, 100.
- [57] 唐丽云, 李国红, 王步利, 等. 利用黄水酯化液提高浓香型白酒质量[J]. 食品与发酵科技, 2013, 49(3): 50-51, 59.
- [58] 杨泉, 杜鹏程, 邓宏, 等. 利用黄水酯化萃取液提高浓香型白酒质量[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(3): 92-97.
- [59] 赵巧珍, 吕志远, 张梦梦, 等. 黄水酯化液在养护窖池中的应用研究[J]. 酿酒科技, 2022(4): 78-81.
- [60] 王永伟, 谢杰, 张聪芝, 等. 黄水醋饮生产工艺研究[J]. 酿酒科技, 2016(3): 52-56.
- [61] 郭璟. 白酒发酵副产物黄水的综合利用研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [62] 李家民. 一种利用固态法白酒酿造伴生品生产酱油的方法: CN200610022123.0[P]. 2010-05-12.
- [63] 霍嘉颖. 黄水多糖的分离鉴定及其对肠道屏障保护功能机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [64] 杨娇, 赵兴秀, 何义国, 等. 黄水多糖的分离纯化、结构表征及益生性研究[J]. 酿酒科技, 2023(4): 116-120, 125.
- [65] LI M, SU J, WU J H, et al. The regulatory effect of Huangshui polysaccharides on intestinal microbiota and metabolites during *in vitro* fermentation[J]. **J Agr Food Chem**, 2024, 72(10): 5222-5236.
- [66] 何宏魁, 罗磊, 曹润洁, 等. 利用酿酒副产物黄水制备的食用菌培养基及方法及应用: CN202311341327.0[P]. 2023-12-19.
- [67] 王涛, 幸洪君, 任崇名, 等. 黄水培养鸡腿菌丝体初步研究[J]. 酿酒科技, 2009(1): 111-113.
- [68] 袁华冠. 白酒发酵副产物黄水在农作物种植中的应用[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2021.
- [69] 李小杰, 张梦梦, 吕志远, 等. 利用白酒酿造的固废料制作生物有机肥及其应用的方法[J]. 酿酒, 2024, 51(2): 138-141.
- [70] 王莉, 王和玉, 江友峰, 等. 一种利用酱香型白酒酒糟与废弃窖泥混合发酵制备有机肥的生产工艺: CN202110440583.X[P]. 2023-06-02.
- [71] 杨帆, 周建国, 王慧, 等. 一种基于废弃窖泥的陶粒及其制备方法: CN202210594521.9[P]. 2023-06-16.
- [72] 蒋黔湘, 罗志坚. 一种基于废弃窖泥的生土建筑材料及其制备方法和应用: CN202011360000.4[P]. 2021-03-09.
- [73] 余朝静, 马月月, 钟音亮, 等. 酱香酒废弃窖泥和酒糟混合制备颗粒燃料的方法及系统: CN112500904A[P]. 2021-03-16.
- [74] 聂正东. 一种用于高温制曲的培养液及使用该培养液制曲的方法: CN201310508083.0[P]. 2016-02-17.
- [75] 吴煜樟, 郭敬杰, 高宇. 酱香型白酒大曲生产使用稻草的研究进展[J]. 食品科技, 2023, 48(6): 62-66.
- [76] 屈阳, 李月中, 朱卫兵, 等. 回料对餐厨垃圾二步法堆肥处理效果的影响[J]. 环境卫生工程, 2023, 31(1): 16-21, 32.
- [77] NGUYEN V H, TOPNO S, BALINGBING C, et al. Generating a positive energy balance from using rice straw for anaerobic digestion[J]. **Energy Rep**, 2016, 2: 117-122.
- [78] 梁萌, 毕良玉, 姚元滋, 等. 浓香型窖泥培养液在白酒生产中的应用[J]. 酿酒, 2017, 44(4): 52-56.
- [79] 熊诚, 刘煦晴, 向家新, 等. 小型酱香型白酒企业锅底水——窖底水厌氧产甲烷及其替代锅炉燃煤的研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 72-75, 204.
- [80] 黎崎均, 苏建, 张富勇, 等. 利用微藻处理酿酒废水及资源化的研究进展[J]. 工业水处理, 2023, 43(9): 59-71.