

doi:10.19677/j.issn.1004-7964.2024.06.007

# 干化技术对酒糟生物质资源化利用的影响

杜陶<sup>1</sup>, 李霞<sup>1,2</sup>, 王毓嘉<sup>1</sup>, 叶锐<sup>1\*</sup>, 肖霄<sup>1,2\*</sup>

(1. 四川大学轻工科学与工程学院, 四川 成都 610065; 2. 四川大学制革清洁技术国家工程实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 经济高效的干化技术对于包括农林废弃物、制革废弃物和工业有机固废等生物质的资源化转化利用至关重要。中国白酒产量巨大, 为国家经济发展和人民物质需求带来贡献的同时, 也产生了大量的废弃酒糟。废弃酒糟具有含水量高、酸度高、易霉变等问题, 不易处理, 导致其资源化利用一直面临困难。高效、低成本的酒糟干化技术对于其资源化利用具有决定性意义。因此, 文章介绍了不同工艺酒糟的特点, 详细综述了多种酒糟干化预处理技术与资源化利用技术, 以期对酒糟的资源化、能源化转化利用提供借鉴, 为酿酒行业在“双碳”背景下的绿色可持续发展和转型升级奠定基础。

**关键词:** 酒糟; 干化; 资源化利用; 生物质; 酿酒; 可持续发展; 固体废弃物

**中图分类号:** TS 261.9 **文献标志码:** A

## Impact of Drying Technology on Biomass Resource Utilization of Distillers' Grains

DU Tao<sup>1</sup>, LI Xia<sup>1,2</sup>, WANG Yujia<sup>1</sup>, YE Rui<sup>1\*</sup>, XIAO Xiao<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. National Engineering Laboratory for Clean Technology of Leather Manufacture, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Efficient and cost-effective drying technology is critical to the value-added utilization of agricultural and forestry waste, tannery waste, and industrial organic solid waste. The huge production of Chinese Baijiu not only contributes to the economic development of the country, but also produces a large amount of waste distillers' grains. The resource utilization of distillers' grains is limited due to its high moisture content and acidity. It is also easy to mildew, which is hard to deal with. The efficient and low-cost distillers' grains drying technology is of decisive significance for its resource utilization. Therefore, the character of distillers' grains produced by various fermentation processes was introduced in this work, and the drying and utilization technologies of distillers' grains were also reviewed, which helps the resource utilization and energetic conversion of distillers' grains. It also lays a foundation for the sustainable development and green transformation of Baijiu industry.

**Key words:** distillers' grains; drying; resource utilization; biomass; distill Baijiu; sustainable development; solid waste

## 引言

生物质来源广泛、产量巨大, 其高值化资源化

利用对于“双碳”战略的实施具有重要意义。农林废弃物、制革废弃物、工业有机固体废弃物等生物质资源, 普遍存在含水率较高的问题, 处置不当不仅会造成资源的浪费, 还会造成环境污染<sup>[1]</sup>。因此, 高效的干化技术对农林废弃物、制革废弃物和工业有机固体废弃物等的资源化利用至关重要。不同来源的生物质需选择合适的干化技术, 例如酒糟等高含水率固体废弃物, 选用高效、经济的干化技术是其资源化利用的前提<sup>[2]</sup>。

中国白酒品种丰富, 产业规模庞大, 近年来, 我

收稿日期: 2024-03-15 修回日期: 2024-05-16 接受日期: 2024-05-20  
基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1901102)

第一作者简介: 杜陶(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 生物质资源化利用。E-mail: dutao@stu.scu.edu.cn。

\* 通信作者: 肖霄(1988-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 生物质转化利用与生物质功能材料。E-mail: xiao\_xiao@scu.edu.cn; 叶锐(1982-), 男, 正高级工程师, 主要研究方向: 生物质转化利用, 低温高效分离技术。E-mail: 40165462@qq.com。

国每年酿造白酒超过 1 000 亿升,为经济发展做出积极贡献并满足了人民日益增长的物质需要<sup>[3]</sup>。然而,每生产 1 t 的白酒会产生 3~4 t 的酒糟,其含水量和挥发性有机物含量高,易霉变,若不进行有效处理会严重危害环境<sup>[4]</sup>,为我国酿酒企业带来了巨大的环保压力。酒糟主要包含稻壳、高粱壳等酿酒副产物,是优良的生物质资源,若对其进行资源化利用,既可避免酒糟带来的环保问题,又可为酿酒企业带来经济效益。因此,如何利用好酒糟资源是酿酒企业在“双碳”背景下亟待解决的问题。

传统的酒糟处理方式主要通过焚烧或直接掩埋,焚烧会产生包括二噁英在内的大量有害气体,严重污染大气环境;直接掩埋后,酒糟中的醇、酸、酯类物质会对土壤和地下水造成污染<sup>[5]</sup>。传统处置方式不光浪费了大量的资源,还对环境造成了严重污染。如何对酒糟进行资源化、能源化利用是酿酒行业面对可持续型、环境友好型发展的重要挑战。从业者开发了多种酒糟的资源化利用方式,包括将其用于生产饲料、肥料、食用菌栽培、发酵生产能源等多种途径<sup>[6]</sup>。酒糟的含水率很高,且含有较多的有机质,易发生腐烂,此特点对其资源化利用造成了严重的阻碍和影响<sup>[7]</sup>。在对酒糟进行资源化利用前,进行干化处理以降低酒糟含水率和其中部分的有机物十分关键。

目前,酒糟的干化方式包括自然干燥、真空干燥、浆叶式干燥、流化床式干燥、旋流式干燥等<sup>[8-12]</sup>,本文针对酒糟资源化利用的问题,对酒糟干化技术的发展进行了综述,详细介绍了多种酒糟干化技术以及酒糟后续资源化利用的不同领域。

## 1 酒糟的特点

我国白酒产业规模庞大,白酒种类丰富,有浓香型、酱香型、清香型、米香型<sup>[13]</sup>等 12 类(见表 1)。酒糟(Distillers' Grains, DG)是白酒酿造原料经过固态发酵、蒸煮、蒸馏后剩余的残渣,主要由稻壳、高粱壳等组成,含水量高且富含有机质,存储易腐。此外,酒糟中还含有少量的无机成分,比如钙、磷、钾、硅等<sup>[14]</sup>。

酒糟中,粗纤维、灰分、无氮浸出物、粗淀粉和粗蛋白含量较高。其中,粗淀粉、粗蛋白等是植物本身生长需要的营养成分;酒糟中的稻壳含有木质素、纤维素以及无机硅等<sup>[15]</sup>,

表 1 中国白酒十二种香型及其代表

Tab.1 Twelve types of Chinese liquor and their representatives

序号	香型	代表产品
1	浓香	泸州老窖、剑南春、水井坊、五粮液
2	酱香	茅台、郎酒、金沙酒
3	清香	汾酒
		玉林泉、江津酒
		牛栏山二锅头
4	米香	桂林三花酒
		白边酒
5	兼香	玉泉酒
		西凤酒
6	凤香	董酒
7	药香	石湾玉冰烧
8	豉香	衡水老白干
9	老白干香	酒鬼酒
10	馥郁香	景芝酒、扳倒井
11	芝麻香	李渡酒、四特酒
12	特香	

无机硅是水玻璃的主要成分,而木质素、纤维素等有机物则可用于木质素催化、纤维素发酵等高价化应用<sup>[16]</sup>;酒糟中的磷、钾、钙等无机物是无机肥料的重要成分<sup>[17]</sup>,酒糟中无机物含量具体见表 2。

不同风味白酒酿造后所得酒糟中成分有所差异,主要体现在有机物含量上。了解不同风味酒糟的特点,有助于酒糟的资源化利用。本文主要以浓香型和酱香型酒糟为对象做具体介绍,浓香型和酱香型酒糟的主要成分含量见表 3。

## 2 酒糟资源化利用

在“双碳”战略下,白酒企业向绿色、低碳、可持续发展转型的任务迫在眉睫。传统的酒糟处理方式既浪费资源又污染环境,不满足当前发展的需要,对酒糟进行资源化利用是解决此问题的有效途径,同时可推动白酒企业建设“低碳—零碳企业”<sup>[18]</sup>。酒糟是一类丰富的生物质资源,处理后可生产出初

表 2 酒糟中无机物含量

Tab.2 Inorganic contents in Distillers' Grains

名称/含量%	钙	磷	钾	镁	铁	锰	钠
浓香型	~0.3	~0.2	~0.7	~0.5	~0.1	~0.01	~0.03
酱香型	~1.7	~0.3					

表 3 浓香型与酱香型酒糟主要成分

Tab.3 Main components in Distillers' Grains of Luzhou Flavor and Maotai Flavor

香型	粗蛋白	粗脂肪	粗纤维	粗淀粉	水分	灰分	无氮浸出物
浓香型/%	~16.2	~4.9	~27.3	~12.6	~58.4	~8.9	~28.1
酱香型/%	~18.2	~2.8	~22.1	~8.6	~55.4	~14.4	~34.8

级以及高附加值的产品,包括饲料化、肥料化、基料化、能源化和原料化等利用方式,获得的产品可广泛应用在能源、农业、和医药等行业<sup>[14,19]</sup>。

### 2.1 酒糟用作饲料

酒糟最为广泛的利用便是用做饲料<sup>[20]</sup>,酒糟中富含粗蛋白、粗脂肪、粗淀粉等营养物质,可直接作为饲料喂养动物。但酒糟中的有机质会发酵使其酸度变高,并且酒糟中纤维素含量高,导致其不能完全替代现有的饲料,因此只能按比例添加到现有饲料中<sup>[21-22]</sup>。有研究表明,干燥后的酒糟以不高于30%的比例直接添加到牛羊等畜牧动物的饲料中,对其正常生长无明显影响。但目前酒糟作为饲料利用尚无统一的质量标准,需要对预处理、饲料品质的稳定性、对不同禽畜的适应性和安全性等进行更深入的研究<sup>[23]</sup>。

### 2.2 酒糟用作肥料

酒糟中有机质含量高,并含有氮、磷、钾等元素,将其制成肥料是一条可行的途径。将酒糟施入土壤中可提高土壤养分的含量并改善微生物群落结构,对植物的生长发育具有积极作用,可提高作物的产量和品质<sup>[24]</sup>。酒糟作为肥料利用的方式包括直接施入田地、堆肥还田以及制作微生物有机肥等<sup>[25]</sup>。酒糟堆肥是利用其中有机物在好氧条件下的分解特性,只留下酒糟中的无机物以及部分易腐蚀成分,经堆肥后的酒糟可用作肥料添加剂或制作肥料,有研究者将功能化细菌接种于酒糟中堆肥,结果表明此方式可促进腐熟作用以及提高肥料质量<sup>[26]</sup>。

### 2.3 酒糟用作食用菌栽培

利用酒糟培育食用菌既能有效保护环境,又能实现经济循环。将酒糟用作食用菌栽培技术已经发展了一段时间,但目前受制于不同风味酒糟的生产原料和工艺不同,其营养成分也存在较大差异。目前,已经有通过酒糟栽培平菇、草菇、茶树菇等技术<sup>[27]</sup>,一些食用菌种类以及配方可见表4,利用酒糟栽培食用菌不仅能促进酒糟资源化的发展,也能提高食用菌栽培技术的发展,带动资源循环利用<sup>[28]</sup>。

### 2.4 酒糟能源化转化利用

将酒糟进行能源化利用是对其高值化应用的重要方向,主要可分为用作燃料直接燃烧加热,热

表4 酒糟栽培食用菌种类及配方<sup>[28]</sup>

Tab.4 Types and formulas of edible mushrooms cultivated on Distillers' Grains	
种类	配方/含量%
平菇	酒糟 50%、棉籽壳 28%、木屑 10%、麸皮 10%、石灰 1%、蔗糖 1%
茶树菇	酒糟 90%、棉籽壳 2%、麦麸 5%、过磷酸钙 1%、石膏粉 1%
鸡腿菇	酒糟 50%、棉籽壳 41%、阔叶木屑 5%、糖 1%、磷肥 1%、石膏 2%
秀珍菇	酒糟 80%、棉籽壳 12%、麸皮 5%、石膏粉 1%、石灰 1%、蔗糖 1%
金针菇	酒糟 40%、棉籽壳 20%、木屑 40%
猴头菇	酒糟 72%、棉籽壳 1%、木屑 10%、麸皮 4%、过磷酸钙 1%、石膏粉 1%
杏鲍菇	酒糟 25%、栎树锯末 73%、石膏 1%、石灰 1%

解生产可燃气、发酵生产燃料乙醇、发酵制备沼气等方面<sup>[29]</sup>。

酒糟可直接作为燃料使用,其来源广泛、产量高、成本低廉,是有效的生物质能载体,通过简单的物理、化学或生物转化方式可使其发挥出较高的能源价值,并有望实现部分化石燃料的替代<sup>[30]</sup>。酒糟中的挥发性物质含量高,燃点低,干燥后可直接作为锅炉的燃料,或者作为添加料与其他燃料掺杂使用,有研究表明将酒糟与煤掺杂在一起燃烧可提高煤的燃尽率<sup>[31]</sup>。将酒糟通过致密成型技术制成固体燃料也是一种途径,成型后酒糟燃料的堆积密度能达到 1 000 kg/m<sup>3</sup>,使用时也更加方便,可用于燃烧炉、气化炉等<sup>[29]</sup>。

热裂解技术作为酒糟高值化利用的重要方法之一,是在无氧或者限氧条件下通过高温将其转化为生物质可燃气、生物油和生物炭的技术,热解的过程较为复杂,产物应用潜力大,具有较高的能源利用率。热裂解产物用途广泛,可燃气可用于供热,生物油可用于合成化学品,生物炭可用于改善土壤、吸附净化、电极材料等<sup>[32]</sup>。

酒糟发酵制沼气也是其能源化利用的技术之一,酒糟在厌氧的条件下经过厌氧微生物的发酵容易被分解成为沼气和水,沼气的主要成分为甲烷,甲烷又是天然气的主要成分。利用此特性,可对酒糟进行厌氧发酵生产沼气,每吨酒糟发酵可产生约 20 m<sup>3</sup> 的沼气<sup>[30]</sup>。

酒糟富含淀粉和糖类,可作为生产燃料乙醇的原料。采用固态工业发酵,其产率可达 4.18%,利用优良的酵母菌发酵,能够提高燃料乙醇的产率,最终能够达到 6.15%<sup>[33]</sup>。

## 3 干化技术

经济高效的干化技术作为平台技术,对以农林废弃物、制革废弃物和工业有机固废为代表的生物

质的资源化利用十分重要。以有效的干化技术对生物质进行预处理,是其有效利用的先决条件,特别是对于酒糟等含水率高的生物质资源,干化预处理对其转化利用的影响更为显著<sup>[34]</sup>。酒糟含水率高达 60%~65%,且含有较多的有机质,存储易腐蚀<sup>[35]</sup>,容易对环境造成污染。对酒糟进行干化处理可使其含水率大大降低,并部分去除有机物,为后续进行资源化利用奠定基础。不同的干化方式存在着经济成本、干燥效率的不同,选择合适的干化技术对酒糟资源的综合利用有十分重要的意义。

### 3.1 添加生石灰干燥

将生石灰加入到酒糟中,生石灰与水发生化学反应生成氢氧化钙,此过程会放出约 5.7 MJ 的能量<sup>[8]</sup>,并中和酒糟中的酸度。干化效率具体可见表 5。

生石灰的添加量在一定程度上会提高酒糟的干化速率,当添加量低于 5%时,随生石灰添加量增加,干化速率提高,当添加量达到 5%,干燥时间为 24 h 时,酒糟的酸度降为 0,含水量由初始时降至 30%左右,此时干燥效果最优<sup>[36]</sup>。总体而言,使用生石灰对酒糟进行干化,具有较好的效果,但此过程易引入新的污染物,为酒糟后续应用带来一定挑战。

### 3.2 自然干燥

通过自然晒干的方式直接将酒糟干燥,不需要人工加热,也不需要干燥设备和排除干燥介质,但是干燥时间过长,效率低下,自然干燥后酒糟的水分、蛋白质、脂肪含量较高,干燥程度难以掌控。同时,自然干燥需将酒糟平铺于地面,对场地需求大,且干燥过程中伴随着挥发性有机物的挥发,会对周围空气造成一定程度的污染<sup>[37]</sup>。

### 3.3 真空干燥

表 5 生石灰添加量对酒糟含水量及酸度的影响<sup>[8]</sup>

Tab.5 Effect of quicklime addition on the water content and acidity of Distillers' Grains

生石灰添加量	0%	1%	3%	5%	7%
原始状态	含水量/%	64.4	64.4	64.4	64.4
	酸度/%	3.1	3.1	3.1	3.1
处理 6 h 后	含水量/%	60.1	56.7	53.3	51.7
	酸度/%	3.5	2.6	2.1	2.0
处理 12 h 后	含水量/%	54.5	50.5	47.8	45.0
	酸度/%	4.3	2.1	1.6	1.4
处理 18 h 后	含水量/%	51.7	44.8	39.6	36.2
	酸度/%	5.0	1.6	1.5	0.5
处理 24 h 后	含水量/%	49.3	40.1	36.5	31.8
	酸度/%	5.5	1.4	0.7	0

真空干燥技术的原理是通过降低干燥室内的气压,使待干燥物内的水或挥发性物质在较低温度下直接从固态或液态转变为气态,从而快速去除待干燥物中的水分或挥发性成分。有研究表明,将真空温度设置为 50 ℃时,干燥 110 min 后,谷物的含水率下降了 ~7%,并且干燥效率逐渐下降。使用真空干燥酒糟可加快其中水分的蒸发,提高干燥的效率,干燥过程的可控性较好<sup>[38]</sup>。

### 3.4 滚筒干燥

滚筒干燥技术的原理是将待干燥物输送到滚筒的内壁,使其在滚筒内不断翻滚振荡,同时对滚筒壁进行加热,促进待干燥物的水分蒸发和可挥发性物质的脱除。使用滚筒干燥设备对酒糟进行干燥,首先通过传送带将酒糟送入滚筒设备,在其中进行翻滚加热干燥后,再通过滚筒内壁的挡板或底部的出料口将干燥后的酒糟收集<sup>[39]</sup>。李家勇<sup>[39]</sup>利用滚筒干燥将原始酒糟的含水率降低至 50%左右,并研究了其中需要的能耗,发现当温度设置为 470 ℃时,能得到较好效果。使用滚筒干燥技术的优点是其机械化程度高,干燥能力较强,操作稳定可控,酒糟干燥的均匀性好。

### 3.5 闪蒸干燥

闪蒸干燥的原理是将空气经加热后由鼓风机经底部进风口吹入干燥设备的内部,通过干燥室内的搅拌器带动空气形成高速的旋转气流,增强热质交换,热空气会在干燥室内螺旋上升,形成强烈的风场。待干燥物在干燥室底部被热空气预热,然后随着气流旋转上升,在这个过程中由于搅拌器和热气流撞击作用下,待干燥物体会变成颗粒状<sup>[10,40]</sup>。冯殿义等人通过闪蒸干燥方法对酒糟进行干化,得到最低含水率为 3.92%。此方法有较高的干化效率,并且得到的干燥酒糟颗粒大小均匀,能耗较低<sup>[41]</sup>。

### 3.6 循环流化床干燥

循环流化床干燥技术是使加热后的气体从流化床干燥器的底部进入,然后通过干燥器的物料层,待干燥物在气氛的包裹下发生热质交换,最后从干燥器上部离开可通过调节流化速度来控制干燥效率,使待干燥物体充分干燥<sup>[10,42-43]</sup>。泸州老窖公司采用流化床解耦燃烧技术来处理酒糟,得到良好的经济效益,刘方金利用流化床技术干燥生物质颗粒,得出当颗粒直径在 3~8 mm,床高 600 mm,温度为 300 ℃时能得到较好的结果<sup>[44]</sup>。使用流化床干燥

酒糟可获得干燥均匀、冷却好的酒糟,并且此过程是在全密闭结构中进行,干燥环境清洁,流化过程匀称,是一种高效清洁的干化技术<sup>[45]</sup>。

### 3.7 太阳能带式干燥

太阳能带式干燥的原理是通过太阳能集热器吸收太阳能并将其转换为热能传递给导热油,导热油升温后进入蒸汽发生器与水发生热交换得到水蒸汽,再通过水蒸气加热空气,并由风机将其吹入干燥室内。在干燥室内,待干燥物会随着传送带向前均匀移动,加热后的空气会自上而下穿过待干燥物,发生热质交换,从而达到干燥的目的<sup>[46]</sup>。使用太阳能带式干燥对酒糟进行干化处理可节约能源,并通过调节空气量、传送速率、加热温度条件来获取最佳的干燥效果。

### 3.8 桨叶式干燥

桨叶式干燥的原理是通过桨叶干燥机的桨叶对待干燥物进行加热,桨叶干燥机的热轴和夹套均为中空,在其工作时,热轴和夹套都通入加热介质,由桨叶在干燥室内部的搅拌作用和本身的热量对待干燥物进行加热。桨叶干燥机的结构如图1所示,其干燥的过程如下:桨叶干燥机从进料口到出料口具有一定的倾斜角度,待干燥物在重力与空心热轴的搅拌下逐渐向出料口移动,在此过程中,热轴不停地转动并且换热,防止待干燥物粘接团聚,使其得到最大限度的混合,保证干燥的均匀性<sup>[11,47]</sup>。

有从业者利用桨叶式干燥器对酒糟颗粒进行干燥,发现在温度为 160 ℃,干燥时间为 25 min 时能得到较好干燥效果,酒糟的含水率能从初始的 ~60% 降低至 4.9%<sup>[11]</sup>。使用桨叶式干燥技术对酒糟进行干化可得到干燥均匀松散的酒糟粉末,干燥效果较好,耗能较低。

### 3.9 旋流自转干燥

旋流自转干燥的原理是通过待干燥物在旋流干燥器内部进行高速离心运动和震荡作用,使物体内部的水分克服孔道阻力从而脱除,实现固液分离。旋流干燥设备主要由三部分构成,分别是进料机、电热风机、旋流分离器。进料机器由堆料漏斗和传送带组成,将一定量的原料堆入堆料漏斗,通过调节进料速率便可实现半自动送料;电热风机可提供热载气,将待干燥物吹入旋流分离器中,并使待干燥物在分离器中进行旋转,防止其黏附在分离器内壁;分离器提供足够长的管道场所,使得干燥物

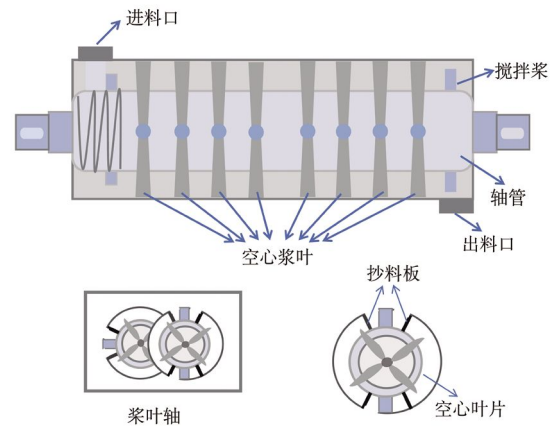


图1 桨叶干燥机  
Fig.1 Paddle dryer

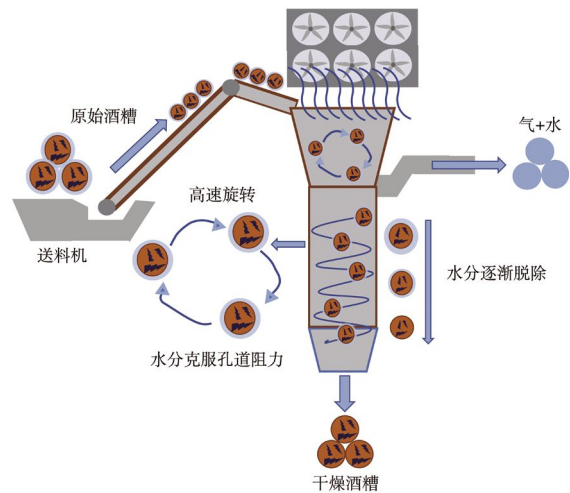


图2 旋流干燥原理  
Fig.2 Cyclonic drying mechanism

能充分旋转运动并脱水<sup>[48-49]</sup>。

有学者利用旋流干燥方式对酒糟进行干化,发现在进气口温度为 80 ℃,送料速率为 80 kg/h 时能得到较好的干化效率,其酒糟的含水率从 ~60% 最低可降至 ~6%<sup>[49]</sup>。旋流干燥技术可在较低温度下脱出酒糟中的水分,并部分去除有机物,干燥效率较高,耗能较低。

在生产中,干燥技术是一个非常重要的单元,对酒糟进行资源化利用前需要对其干化处理,针对白酒行业,合适的干燥技术对酒糟干化有着十分重要的意义,白酒企业应结合本身的特点,采用高效、环保的酒糟干化方式,为酒糟的资源化利用提供更好的条件和基础。

## 4 总结与展望

酒糟是丰富的生物质资源,来源广泛,具有良

好的应用潜力。从业者对酒糟资源进行了大量的探索与实践,对酒糟资源化发展以及白酒行业可持续发展做出了贡献。针对于酒糟资源化利用过程中面临的高含水率、不易贮存的问题,应深入研究各种酒糟高效干化预处理技术。干化技术作为平台技术随工业进步也迅猛发展,种类多样、经济高效的干化技术对生物质资源化应用起到了支撑性的作用,针对资源化利用的不同方面选择不同的干化技术,可实现酒糟的高效、低成本、快速脱水,助力酒糟多级资源化利用,以获得更高的经济和环保效益。本文简要总结了将酒糟进行饲料化、肥料化、原料化和能源化等方面进行资源化利用的方式,讨论了干化预处理对其的影响,阐述了相关干化技术的特点,为包括酒糟、农林废弃物,制革废弃物在内的典型固废生物质资源化利用奠定了良好的基础。

#### 参考文献:

- [1] 尉吉乾,李丹,王京文,等.农林废弃物的资源化利用研究进展[J].中国农学通报,2023,39(6):77-81.  
WEI J Q,LI D,WANG J W,et al.Resource utilization of agricultural and forestry wastes:Research progress[J].Chin Agric Sci Bull,2023,39(6):77-81.(in Chinese)
- [2] 卢卫.生物质干燥系统的优化与节能研究[D].天津:天津科技大学,2016.  
LU W.Optimization and energy saving of biomass drying system[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016.(in Chinese)
- [3] 李依阳,张宿义,杨红军,等.酿酒废弃物资源化利用研究进展[J].酿酒科技,2021(7):102-105,109.  
LI Y Y,ZHANG S Y,YANG H J,et al.Research progress in resourceization of spent grains[J].Liquor-Making Sci Technol, 2021(7):102-105,109.(in Chinese)
- [4] 王鹏晓,肖进彬,刘晓杰,等.白酒酒糟资源化利用现状及展望[J].现代食品,2022,28(17):1-4.  
WANG P X,XIAO J B,LIU X J,et al.Status and prospect of resource utilization of Baijiu distiller's grains [J].Mod Food, 2022,28(17):1-4.(in Chinese)
- [5] 赵欢兰.白酒酒糟资源循环化利用发展趋势[J].现代食品,2021,27(4):100-102.  
ZHAO H L.Development trend of recycling utilization of Chinese Baijiu distiller's grains resources [J].Mod Food,2021, 27(4):100-102.(in Chinese)
- [6] 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.  
FAN Q G,LI L L,LUO H B,et al.Research progress on re-source utilization technology of Baijiu brewing by-products [J].China Brew,2023,42(9):1-6.(in Chinese)
- [7] 杨志波.酱香型白酒糟资源化综合利用的研究[D].贵阳:贵州大学,2016.  
YANG Z B.Maotai-flavor liquor vinasse resource comprehensive utilization research[D].Guiyang:Guizhou University, 2016.(in Chinese)
- [8] 张磊,刘绪,何皎,等.白酒丢糟干燥方法的探讨[J].食品与发酵科技,2012,48(4):88-91.  
ZHANG L,LIU X,HE J,et al.Discussion of drying method of liquor distiller's grain [J].Food Ferment Sci Technol,2012,48 (4):88-91.(in Chinese)
- [9] 王法利,潘天全,李增,等.白酒酿造废水丢糟回收干燥装置的设计与应用[J].机械研究与应用,2021,34(3):99-100,103.  
WANG F L,PAN T Q,LI Z,et al.Design and application of recycle and drying device for the liquor brewing wastewater [J].Mech Res Appl,2021,34(3):99-100,103.(in Chinese)
- [10] 单纯.浅谈化工生产中的干燥技术应用[J].天津化工,2019,33(4):5-7.  
DAN C.Introduction to the application of drying technology in chemical production[J].Tianjin Chem Ind,2019,33(4):5-7. (in Chinese)
- [11] 王辛幸,郭中山,黄帅.酒糟生物桨叶干燥的试验研究[J].新型工业化,2021,11(11):24-25.  
WANG X X,GUO Z S,HUANG S.Experimental study on bio-paddle drying of Distillers'Grains [J].J New Ind,2021,11 (11):24-25.(in Chinese)
- [12] 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.  
LI X.Resourceization of distillers grains of Jiangxiang Baijiu[J]. Liquor-Making Sci Technol,2023(8):128-131.(in Chinese)
- [13] 杨柳.中国白酒香型划分回顾与反思[J].酿酒科技,2016(5):115-116,120.  
YANG L.Review and reflection of the classification of Chinese Baijiu flavor types[J].Liquor-Making Sci Technol,2016 (5):115-116,120.(in Chinese)
- [14] 张银,任廷远.酒糟综合利用现状及存在的关键问题[J].农产品加工,2019(16):59-62.  
ZHANG Y,REN T Y.Present situation and key problem of comprehensive utilization of distiller's drains [J].Farm Prod Process,2019(16):59-62.(in Chinese)
- [15] 黄孟阳,秦辉,蔡小波,等.酿酒丢糟资源化利用现状及

- 研究进展[J].酿酒科技,2023(11):93-98.  
HUANG M Y,QIN H,CAI X B,et al.Research progress in resourceization of distillers grains[J].Liquor-Making Sci Technol,2023(11):93-98.(in Chinese)
- [16] 唐瑜.稻壳制备活性炭及其在负载催化制备生物柴油中的研究[D].南京:南京财经大学,2016.  
TANG Y.Studies on the production of activated carbon by rice husk and its applications in producing biodiesel [D].Nanjing:Nanjing University of Finance and Economics,2016.(in Chinese)
- [17] 陶雪,吕佳顺,许华杰,等.酒糟综合利用研究进展及茅台实践[J].中国酿造,2023,42(6):22-27.  
TAO X,LY J S,XU H J,et al.Research progress on comprehensive utilization of distillers'grains and practices of Moutai [J].China Brew,2023,42(6):22-27.(in Chinese)
- [18] 李顺滢,陈昊翔,周远浩,等.黄酒糟资源化利用技术研究进展[J].中国酿造,2023,42(8):1-6.  
LI S Y,CHEN H X,ZHOU Y H,et al.Research progress on resource utilization technology of Huangjiu lees [J].China Brew,2023,42(8):1-6.(in Chinese)
- [19] 李德.白酒糟综合利用现状及多级链式开发技术研究[J].酿酒科技,2018(4):101-105.  
LI D.Present situations of comprehensive utilization of distillers grains and study of multistage chain development technology[J].Liquor-Making Sci Technol,2018(4):101-105.(in Chinese)
- [20] 李曦,陈小文.白酒副产物资源化利用综述[J].食品与发酵科技,2021,57(1):115-118.  
LI X,CHEN X W.Review on Resource utilization of liquor by-products [J].Food Ferment Sci Technol,2021,57(1):115-118.(in Chinese)
- [21] 李茂雅,陈玉连,成启明,等.酒糟饲料化利用的研究进展[J].中国饲料,2022(15):133-138.  
LI M Y,CHEN Y L,CHENG Q M,et al.Research progress on the utilization of distiller's grains [J].China Feed,2022(15):133-138.(in Chinese)
- [22] 范方勇,谢玉松,甘宁,等.酒糟饲料发酵微生物菌剂组合方案筛选[J].食品与发酵科技,2022,58(2):102-106,110.  
FAN F Y,XIE Y S,GAN N,et al.Screening of fermentation microorganism for distiller's grains [J].Food Ferment Sci Technol,2022,58(2):102-106,110.(in Chinese)
- [23] 刘运飞,任明晋,雷荷仙,等.白酒糟的饲料综合利用研究进展[J].农技服务,2023,40(1):88-90.  
LIU Y F,REN M J,LEI H X,et al.Progress of feed utilization of Chinese Baijiu distillers'grains [J].Agric Technol Ser,2023,40(1):88-90.(in Chinese)
- [24] 倪世俊.酒糟是种好肥料[J].新农业,2006(1):42-43.  
NI S J.Distillers'grains are good fertilizers[J].Mod Agric,2006(1):42-43.(in Chinese)
- [25] 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.  
CHEN Z J.Application of the flavor resource utilization of dregs in the brewing of Guizhou liquor with major aroma[D].Guiyang:Guizhou University,2022.(in Chinese)
- [26] 吴正肖.复合微生物肥料研制与效果研究[D].贵阳:贵州大学,2017.  
WU Z X.Development and effect of compound microbial fertilizers[D].Guiyang:Guizhou University,2017.(in Chinese)
- [27] 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.Progress of high value utilization of distillers' grains[J].China Food Saf Mag,2018(33):160-161.(in Chinese)
- [28] 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.  
REN Y,WANG S,WANG T.Research status of edible fungi cultivated by distillers'grains[J].China Brew,2017,36(3):5-9.(in Chinese)
- [29] 张磊,刘念,边名鸿,等.丢糟制备生物质环保型燃料的研究[J].食品与发酵科技,2016,52(4):78-82.  
ZHANG L,LIU N,BIAN M H,et al.Biomass environment-friendly fuel preparation of distiller's grain [J].Food Ferment Sci Technol,2016,52(4):78-82.(in Chinese)
- [30] 曹忠耀,陶雪,闫松显,等.贵州省酒糟利用方式分析及能源潜力评估 [J].化工设计通讯,2023,49(9):118-120,123.  
CAO Z Y,TAO X,YAN S X,et al.Analysis of utilization methods and energy potential evaluation of distiller's grains in Guizhou Province[J].Chem Eng Des Commun,2023,49(9):118-120,123.(in Chinese)
- [31] 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.  
XU D X.Experimental study on co-firing characteristics of coal and distillers'grains/sludge blends[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2020.(in Chinese)
- [32] 杨威.酒糟热解特性及其活性炭制备的研究[D].湛江:广东海洋大学,2020.  
YANG W.Study on pyrolysis characteristics of distillers grains solid waste and preparation of activated carbon [D].Zhanjiang:Guangdong Ocean University,2020.(in Chinese)

- [33] 郝标,王静,张庆龙.曲酒糟发酵生产燃料乙醇技术研究[J].酿酒,2015,42(1):108-111.  
HAO B,WANG J,ZHANG Q L.Production of fuel ethanol fermentation starter lees utilization research [J].Liquor Making,2015,42(1):108-111.(in Chinese)
- [34] 雷廷宙,沈胜强,李在峰,等.生物质干燥机的设计及试验研究[J].可再生能源,2006(3):29-32.  
LEI T Z,SHEN S Q,LI Z F,et al.Experimental study and design for biomass drier [J].Renew Energy Resour,2006(3):29-32.(in Chinese)
- [35] 左上春,杨海泉,邹伟.白酒酒糟资源化利用研究进展[J].食品工业,2016,37(1):246-249.  
ZUO S C,YANG H Q,ZOU W.Recent progress on the utilization of distiller's grains:a review [J].Food Ind,2016,37(1):246-249.(in Chinese)
- [36] 张磊,刘绪,刘念,等.生物质环保型新燃料的燃烧分析[J].食品与发酵科技,2012,48(3):78-80.  
ZHANG L,LIU X,LIU N,et al.Combustion analysis of biomass environment-friendly fuel [J].Food Ferment Sci Technol,2012,48(3):78-80.(in Chinese)
- [37] 陈颖.不同干燥方式对板栗酒糟营养成分影响及在焙烤食品中的应用研究[D].秦皇岛:河北科技师范学院,2020.  
CHEN Y.Effects of different drying methods on nutritional components of Chinese chestnut rice wine draff and their application in baked food [D].Qinhuangdao:Hebei Normal University of Science and Technology,2020.(in Chinese)
- [38] 佟童,吴春升,田新庆,等.电磁加热谷物真空干燥工艺研究[J].农机使用与维修,2023(8):72-75.  
TONG T,WU C S,TIAN X Q,et al.Study on vacuum drying process of electromagnetic heating grain[J].Agric Mach Using Maintenance,2023(8):72-75.(in Chinese)
- [39] 李家勇,杨健.滚筒烘干机在酒糟干燥中的应用[J].南方农机,2019,50(22):190-191.  
LI J Y,YANG J.Application of drum dryer in Distillers'Grains drying [J].China Southern Agric Mach,2019,50(22):190-191.(in Chinese)
- [40] 栾昊.旋转闪蒸干燥技术在盐化工生产中的应用[J].中国井矿盐,2003,34(6):32-35.  
LUAN H.The application of rotary flash drying process to the salt chemical production [J].China Well Rock Salt,2003,34(6):32-35.(in Chinese)
- [41] 冯殿义,孙彤.旋转闪蒸干燥器干燥酒糟过程的实验研究[J].化学工程,2006,34(2):13-15.  
FENG D Y,SUN T.Experimental study on the process of the drying deer lees in the spin flash dryer[J].Chem Eng,2006,34(2):13-15.(in Chinese)
- [42] 包浩然.循环流化床生物质气化炉内气固流动与气化特性 CPFD 数值模拟研究[D].包头:内蒙古科技大学,2022.  
BAO H R.Numerical simulation of gas-solid flow and gasification characteristics in a circulating fluidized bed biomass gasifier by CPFD [D].Baotou:Inner Mongolia University of Science&Technology,2022.(in Chinese)
- [43] 韩振南.高含水含氮生物质废弃物双流化床解耦燃烧基础及工业应用[D].北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2017.  
HAN Z N.Fundamentals and industrial applications of dual fluidized bed decoupled combustion of biomass waste with high water and nitrogen content [D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences,2017.(in Chinese)
- [44] 刘方金.生物质循环流化床气化过程分析及试验[D].天津:天津大学,2007.  
LIU F J.Analysis and experiment of gasification process of biomass circulating fluidized bed[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [45] 彭华春,沈才洪,张宿义,等.酒糟循环流化床解耦燃烧技术研究[R].泸州:泸州老窖股份有限公司,2011.  
PENG H C,SHEN C H,ZHANG S Y,et al.Research on decoupled combustion technology of circulating fluidized bed of Distillers'Grains[R].Luzhou:Lu Zhou Laojiao Co.,2011.(in Chinese)
- [46] 黄亚东.基于太阳能利用的酒糟连续干燥设备开发及应用研究[J].酿酒科技,2013(11):77-79,84.  
HUANG Y D.Development and application of continuous drying equipment for distiller's grains based on solar energy[J].Liquor-Making Sci Technol,2013(11):77-79,84.(in Chinese)
- [47] 张仁强,张娟.干燥设备的选型及发展综述[J].硫磷设计与粉体工程,2020(3):8-10,15.  
ZHANG R Q,ZHANG J.Overview of selection and development of drying equipment[J].Sulphur Phosphorus Bulk Mater Handl Relat Eng,2020(3):8-10,15.(in Chinese)
- [48] GAO S H,ZHANG D D,FAN Y P,et al.A novel gas-solids separator scheme of coupling cyclone with circulating granular bed filter (C-CGBF)[J]. J Hazard Mater, 2019, 362: 403-411.
- [49] 刘怡.旋流式热泵干燥过程特性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2022.  
LIU Y.Study on drying process characteristics of swirl heat pump[D].Xiangtan:Hunan University of Science and Technology, 2022.(in Chinese)