

酱香型白酒堆积发酵异常的研究现状与展望

赵湖冰, 杨刚仁, 李旭, 张飞, 罗雕, 朱大超, 陈勇, 李中泰*

(贵州习酒股份有限公司, 贵州 遵义 564622)

摘要: 高温堆积发酵是酱香型白酒的独特酿造工艺之一, 对酱香型白酒特征风味物质的生成具有显著作用。该文系统阐述了酱香型白酒糖化堆堆积发酵异常的种类、不良影响、解决措施及其成效, 并结合项目组生产实践与研究成果, 对酱香型白酒糖化堆堆积发酵异常的原因进行了分析, 以期增进对酱香型白酒堆积发酵异常的认识, 促进酱香型白酒品质的提升。

关键词: 酱香型白酒; 糖化堆; 堆积发酵异常; 解决措施

中图分类号: TS261

文章编号: 0254-5071(2024)10-0001-05

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2024.10.001

引文格式: 赵湖冰, 杨刚仁, 李旭, 等. 酱香型白酒堆积发酵异常的研究现状与展望[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 1-5.

Research status and prospect on abnormal stacking fermentation of sauce-flavor *Baijiu*

ZHAO Hubing, YANG Gangren, LI Xu, ZHANG Fei, LUO Diao, ZHU Dachao, CHEN Yong, LI Zhongtai*

(Guizhou Xijiu Co., Ltd., Zunyi 564622, China)

Abstract: High-temperature stacking fermentation is one of the unique brewing processes of sauce-flavor (Jiangxiangxing) *Baijiu*, which has a significant effect on the formation of characteristic flavor substances of sauce-flavor *Baijiu*. In this paper, the types, adverse effects, solutions and effects of the abnormal stacking fermentation of saccharification piles of sauce-flavor *Baijiu* were systematically described, and the reasons for the abnormal stacking fermentation of saccharification piles of sauce-flavor *Baijiu* were analyzed in combination with the production practice and research results of the project team. It could improve the understanding of the abnormal stacking fermentation of sauce-flavor *Baijiu*, and promote the quality improvement of sauce-flavor *Baijiu*.

Key words: sauce-flavor *Baijiu*; saccharification heap; abnormal stacking fermentation; solution measure

中国白酒历史悠久, 至今已有两千多年, 是世界六大蒸馏酒之一。酱香型白酒作为中国白酒三大基础香型之一, 在中国白酒行业扮演着举足轻重的角色, 以贵州茅台酒为代表的酱香型白酒, 是中国四大名酒之一^[1-2]。由于酱香型白酒独特的酿造工艺和较高的产品品质, 近年来备受消费者喜爱, 并涌现出习酒、郎酒、珍酒、国台等一批全国知名品牌。据有关资料报道^[3], 2022年酱香型白酒以较低的产能占比(约占国内白酒10.43%的产能), 实现了较高的利润总额(约占我国白酒利润总额的39.51%)。赤水河流域作为酱香型白酒原产地和主产区, 在《贵州省“十四五”战略性新兴产业集群发展规划》中, 贵州省明确提出“到2025年, 白酒产量达到60万kL, 酱香型白酒产业集群总产值达到2 500亿元”^[4]。

酱香型白酒生产工艺是“端午制曲, 重阳下沙, 一年一个生产周期, 两次投粮, 九次蒸煮, 八次发酵, 七次取酒”^[5-6], 具有“高温制曲、高温堆积、高温发酵、高温馏酒”的工艺特点。其中, 高温堆积是酱香型白酒独特的酿造方式之一, 其通过网罗、富集环境中的微生物, 促进糖化堆堆积发酵, 进而产生多种风味物质, 赋予酱香型白酒独特的酱香风味,

因此, 又被称为“二次制曲”^[7-10]。高温堆积发酵在培菌、产酒、生成酱香或酱香前体风味物质等方面具有关键性作用^[11]。周恒刚^[12]通过堆积发酵对比试验表明, 不堆积或堆积发酵时间短, 显著影响酱香型白酒特征风味化合物的形成, 极易导致酱香型白酒酱香风味不突出、酒体风格不典型等问题。存在酿造酱香型白酒“不堆积发酵, 则产出的白酒不具备酱香型白酒特征风味”的现象^[13-14]。受气候环境、生产工艺特点、工序操作等客观因素的影响, 酱香型白酒酿造过程中, 糖化堆高温堆积发酵工艺环节极易出现升温难或升温慢、中温差、“冷心”“腰线”与糖化堆不同空间点酒醅堆积发酵不均匀等生产异常问题。导致堆积发酵不彻底, 抑制了酱香型白酒高温堆积发酵工艺作用的发挥, 影响酱香风味物质的生成, 甚至影响酱香型白酒的产量与质量。

为推动酱香型白酒高温堆积发酵异常问题的解决, 促进高温堆积发酵工艺环节, 增加酱香型白酒风味物质或风味前体物质, 特对酱香型白酒高温堆积发酵异常进行分析与总结, 以期对增进酱香型白酒堆积发酵异常的认识和优化高温堆积发酵工艺, 促进酱香型白酒品质的提升。

收稿日期: 2024-01-22

修回日期: 2024-05-25

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2023]一般342)

作者简介: 赵湖冰(1998-), 男, 本科, 研究方向为酿酒微生物资源的挖掘与应用。

*通讯作者: 李中泰(1972-), 男, 工程师, 本科, 研究方向为酱香型白酒生产酿造。

1 糖化堆堆积发酵异常的影响及原因分析

1.1 糖化堆堆积发酵异常的类型

糖化堆堆积发酵异常的主要类型及其描述见表1。糖化堆堆积发酵异常对酱香型白酒产、质量存在显著影响。糖化堆不同空间点酒醅的理化指标、微生物、风味物质存在显著差异,成熟糖化堆酒醅温度呈现出以堆底中心为球心向四周辐射递增的趋势(除糖化堆表层结块处),且酒

醅温度变化与微生物生长、理化指标(酸度、温度、水分、氧气含量等)之间存在较强的关联性^[15-16]。糖化堆堆积发酵过程中,如若出现升温难、甚至不升温等堆积发酵异常问题,极易抑制酒醅网罗环境微生物,特别是嗜热微生物的筛选、富集、驯化,进而影响糖化堆糖化发酵、生香作用的发挥,损害酱香型白酒的品质,甚至不产酒^[17]。

表1 糖化堆堆积发酵异常类型描述
Table 1 Types description of abnormal stacking fermentation of saccharification heap

堆积发酵异常类型	现象描述
“腰线” ^[19-21]	是指糖化堆内部(距堆面20~50 cm)或表层(堆面10 cm左右)酒醅表面呈白色或微黄色,且酒醅在湿度大、温度高环境条件下,易呈团状甚至板结,或带“霉味”,干燥、疏松的现象。
升温慢、升温难 ^[22]	是指从糖化堆完堆后开始计,经4~5 d的堆积发酵,糖化堆仍“不来温”、堆顶无温度,甚至在冬季寒冷气候,酒醅在晾堂堆积8 d以上,导致糖化发酵不完全,占据晾堂有限空间影响生产进度的现象。
酒醅升温不均匀、发酵不一致 ^[23]	是指糖化堆各空间点酒醅理化指标(温度、酸度、水分和氧浓度等)、微生物种类和数量的差异未呈现出正常成熟糖化堆变化规律的现象。
“冷心”或中温差 ^[24]	是指糖化堆堆高10~110 cm区间内存在品温为30 ℃以下酒醅,且30 ℃以下酒醅占糖化堆比重超过4.2%左右的现象。

如糖化堆堆积发酵异常问题之一“腰线”。相较于正常堆积发酵的酒醅,产生“腰线”的酒醅温度略高5~10 ℃,酒醅含氧量降低,抑制了微生物的生长繁殖,减少了酒醅微生物种类和某些种类的数量,破坏了堆积发酵过程中多种微生物共同作用的机制,改变多种微生物原有代谢途径,影响酱香型白酒多菌种混合共同作用的固态发酵过程^[18],以及酱香型白酒特征风味的形成。邓子文等^[19]对四轮次酒生产糖化堆堆积发酵“腰线”微生物菌群多样性解析表明,未产生“腰线”的酒醅与产生“腰线”的酒醅微生物真菌类群存在显著差异。汪地强等^[20]对堆积发酵异常糖化堆不同空间点的“腰线”酒醅进行风味组成和微生物构成分析,共计检出风味物质45种,酵母菌和霉菌数量分别在 $10^6\sim 10^8$ CFU/g、 $10^4\sim 10^7$ CFU/g之间,且对酒醅性状存在直接影响。

1.2 糖化堆堆积发酵异常的原因分析

酱香型白酒具有开放式生产的特点,酿造环境中不可控的影响因素较多,可对酱香型白酒堆积发酵产生影响,且堆积发酵过程中酒醅各项指标会随时间的延长发生显著变化^[25-26]。

1.2.1 不同轮次生产酿造环境温度的影响

本项目组对近年来赤水河流域中游酱香型白酒核心产区生产厂房内平均温度进行了测量,得出酱香型白酒核心产区赤水河流域中游酿造过程中,六轮次酒生产环境温度平均值最高(高于30 ℃),一轮次酒生产环境温度平均值最低(低于10 ℃),轮次间的生产环境平均温度极差达24 ℃左右。生产环境温度平均值为:六轮次酒(33.62 ℃)>五轮次酒(30.45 ℃)>七轮次酒(26.34 ℃)>下沙(21.47 ℃)>四轮次酒(23.95 ℃)>三轮次酒(19.53 ℃)>造沙(14.83 ℃)>

二轮次酒(13.29 ℃)>一轮次酒(9.29 ℃);二轮次酒生产期间环境温度波动最大,极差约为17 ℃;造沙、一轮次酒、二轮次酒生产期间环境平均温度低于15 ℃,处于全年度生产环境温度最低时期^[36]。环境中栖息着的微生物区系和种类对大曲酒生产存在直接影响,微生物的种类和数量又与环境温度息息相关^[27]。然而,酱香型白酒有益酿造微生物绝大部分来自于所处的空气环境^[28]。罗太江等^[29]研究表明,不同轮次酒醅最佳入堆温度有所差异,一轮次酒醅收堆温度控制在28~35 ℃时,糖化堆升温最快且酵母菌数量达到 10^7 数量级。因此,糖化堆堆积发酵是否正常与生产环境温度紧密相关。

1.2.2 酱香型白酒独特酿造工艺的影响

酱香型白酒酿造过程中,不同生产轮次酒醅的水分、酸度等理化指标显著不同。酒醅水分过高则会致使其黏度增大,好氧型微生物生长受到抑制,厌氧型微生物加速繁殖,严重时会导致酒醅出现酸败的现象^[30-31];酒醅适宜的酸度能抑制杂菌的生长,为酿酒有益微生物的生长繁殖提供良好环境、提供合成酯类物质的前体,但是酒醅酸度过高则不利于堆积发酵^[32]。同时,酿造原料经下沙、造沙、一轮次蒸煮,淀粉糊化,酒醅黏稠度逐步增强,在重力挤压等多种因素影响下,进而导致糖化堆“堆心”酒醅的溶氧量不断减少。

此外,摊晾、拌曲、上堆、接堆等是酱香型白酒酿造的必要工序。但是,摊晾时间和摊晾面积不足、用曲量和上堆温度不均衡、接堆方式不恰当,都极易导致不同时间入堆酒醅的温度、水分、溶氧量、堆积时长、初始供糖量等存在显著区别,致使酒醅微生物结构与数量存在差异,最终导致糖化堆堆积发酵出现异常问题。如“腰线”的形成重要原因之一就是酿造工序操作不当。

1.2.3 其他因素的影响

糖化堆体积越大,堆积发酵过程中,“堆心”酒醅数量则越多,且经生产实践论证,其糖化堆堆底酒醅则越紧。本项目组调研了赤水河流域部分规上酱香型酒企近年来的单窖投粮数量,调研发现各酒企间的单窖投粮数量差异较大,单窖投粮数量主要集中在10~15 t区间,由于品牌

特性、企业产能、技改进度等原因,个别酒企单窖投粮数量甚至高达18 t左右。

2 糖化堆堆积发酵异常的解决措施及实效

为解决酱香型白酒堆积发酵异常的问题,目前主要从引入设备设施参与堆积发酵工序环节和优化酱香型白酒酿造工艺两方面着手,糖化堆堆积发酵异常处理措施见表2。

表2 糖化堆堆积发酵异常处理措施
Table 2 Treatment measures of abnormal stacking fermentation of saccharification heap

处置措施	措施简介
循环架 ^[34]	是指由上、下圆环和多个连通管构成的装置,形状类似圆台,且圆环和联通管每间隔8~12 cm有孔径为0.1~0.15 cm出气孔。
溶氧器 ^[35-36]	是指由竹条编织或不锈钢材质制作而成,形状类似圆台,内置空心,上、下底面半径分别为20 cm、40 cm,高为1.8 m或1.5 m的装置。
“FD”工艺 ^[37-38] 、倒堆 ^[39] 、破堆移位 ^[22]	是指糖化堆酒醅达到一定堆积温度(43~45 ℃)或不升温时,以“面翻底、底翻面、中心翻四周”为原则,调整糖化堆酒醅布局的方法
造沙轮次堆积新工艺 ^[41]	是指造沙轮次出窖酒醅和新投入高粱单独蒸煮、单独堆积发酵,并混合均匀入窖。
分类处理糖化堆“腰线” ^[21]	是指依据酒醅在糖化堆中位置、板结程度,采取“脱衣穿衣”、“撬堆”、“松堆”等破坏“腰线”层的方法。
“均散式”接堆方式 ^[42]	是指将糖化堆表面1甬数量的酒醅全部刮下,与待上堆酒醅均匀混合,再将糖化堆堆面毡松后上堆的接堆方法。

2.1 引入设备设施参与堆积发酵

在糖化堆堆积发酵过程中,引入设备设施解决堆积发酵异常问题的原理主要是:通过增加糖化堆“堆心”酒醅的溶氧量,促进糖化堆“堆心”酒醅微生物生长繁殖,进而解决堆积发酵“不来温”、升温慢或升温难的问题。王邦坤等^[33]起堆前在地面铺撒20 cm厚的稻壳,将两根不锈钢通风管放置于地面,一端连接“堆心”,一端连接堆外;黄治国等^[34]在糖化堆“堆心”安装循环架,并在糖化堆外部增加空压机的形式为“堆心”酒醅提供氧气及空气中微生物;杨刚仁等^[35-36]在糖化堆起堆时于“堆心”分别放置竹篓、不锈钢材质的溶氧器。引入设备设施参与堆积发酵,均能解决糖化堆在冬季升温难、升温慢、“冷心”等的堆积发酵异常问题,提高“堆心”酒醅温度,影响糖化堆酒醅风味物质形成,并对提高酱香型白酒产量、质量存在促进作用,有一定的应用潜能。

2.2 优化酱香型白酒酿造工艺

2.2.1 调整糖化堆不同空间点酒醅分布

针对冬季恶劣气候环境和机械化酿造探索导致糖化堆酒醅堆积发酵升温不均匀、堆积发酵不彻底、升温慢的问题。当糖化堆堆积发酵达到一定程度后,调整糖化堆上、中、下和堆面、“堆心”的不同位置酒醅的布局,可有效解决上述问题,将其分别称之为“FD”工艺、倒堆和破堆移位的处置方式。

梁添等^[37-38]在二轮次酒堆积发酵时运用“FD”工艺,有效平衡了糖化堆不同空间点酒醅之间的差异。将糖化堆水分控制在52.0%~52.8%、水分含量保持在±0.8%;有效规避某一方位或空间点酒醅酸度持续升高(降低1.72 mmol/10 g),促进淀粉分解(0.76%),增加还原糖含量(0.46%),酒醅温

度均匀升高;显著促进真菌、细菌类微生物的生长和繁殖,如细菌类芽孢杆菌(*Bacillus*)、枝芽孢菌属(*Virgibacillus*)、耐高温的克罗本斯泰亚菌属(*Kroppenstedtia*)、高温放线菌属(*Thermoactinomyces*),真菌类嗜热真菌属(*Thermomyces*)、嗜热子囊菌属(*Thermoascus*)、毕赤酵母属(*Pichia*)、未分类的曲霉菌科(*unclassified-f-Aspergillaceae*)、曲霉菌属(*Aspergillus*)、伊萨酵母属(*Issatchenkia*)等;增加乙酸乙酯、正丙醇等酯类和醇类物质的含量,影响酒的风味物质成分。

张维山等^[39]在当堆积发酵酒醅达到预定温度后,立即开展倒堆试验,结果表明,糖化堆经倒堆后,各空间点酒醅更加一致、均匀,显著影响酱香、醇甜典型体酒的风味和感官品评结果:①酱香典型体酒中,乙醛、甲酸乙酯、正丙醇、甲醇、异丁醇、正丁醇、异戊醇、乳酸乙酯、乙酸、丙酸、异戊酸、亚油酸乙酯含量降低,棕榈酸乙酯、油酸乙酯含量升高;②醇甜典型体酒中,乙醛、甲醇、正丙醇、正丁醇、乳酸乙酯、乙酸、丙酸、异戊酸、棕榈酸乙酯、油酸乙酯物质含量降低,异戊醇、亚油酸乙酯、己酸乙酯物质含量增加;③新酒味、杂醇油味显著减少。

在冬季低温气候,袁再顺等^[22]对一、二轮次酒生产堆积发酵异常糖化堆进行破堆移位处理后,2~3 d内,糖化堆迅速升温至46 ℃左右,各空间点酒醅温度与正常升温糖化堆相近;绝大部分优势真菌含量均有所增加,对芽孢杆菌的生长存在显著促进作用。与之相反的是,卓毓崇等^[40]运用破堆移位技术降低待入窖酒醅的品温,将酒醅温度由43~45 ℃降低至33~35 ℃,确保了大回酒轮次酒醅“前缓升、中挺、后缓落”的窖内发酵规律,出酒率和优质品率分别提升5.0%、2.5%。

2.2.2 造沙轮次堆积发酵新工艺

由于造沙轮次出窖酒醅和新投入高粱在糊化程度、水分、酸度等理化指标存在显著差异。杨飞等^[40]改变传统工艺中生沙、熟沙混合堆积发酵的方式,将下沙轮次出窖酒醅、造沙轮次投入的高粱分别进行蒸煮糊化,同时分开堆积发酵,待达到入窖标准后,再将以上二者均匀混合入池发酵。结果表明,造沙轮次堆积发酵新工艺应用于生产实践中,加强了造沙轮次糖化堆堆积发酵,有效改善传统生产工艺中一轮次酒生涩味、酸味、杂味较重的问题,酒体更干净,显著增加醇、酯、酸类四个碳原子结构以上物质的含量,一轮次酒总酸和总酯分别达5.25 g/L、8.01 g/L,并且对二轮次酒质量仍有一定影响。

2.2.3 分类处理糖化堆“腰线”

结合“腰线”所处位置和感官形状,采取不同处理方式。①糖化堆表层“腰线”,则采取挖松部分堆脚酒醅,再将其均匀覆盖在糖化堆腰部往上位置的方法处理。②距离糖化堆堆面40 cm左右、结板较厚和板结层内外温差较大的腰线,则采取“脱衣穿衣”方法处理:使用抱斗或耙梳等工具,将堆脚1 m左右酒醅挖散拉细,破坏“腰线”层后,再将挖下的酒醅均匀入堆。③距离糖化堆堆面40 cm左右、硬度大、结板层厚度约为3~4 cm的“腰线”,则采取“撬堆”方法处理:将堆脚0.5 m左右酒醅挖散拉细,运用工用具撬松糖化堆,再将挖下酒醅均匀入堆。④距离糖化堆堆面20 cm左右、硬度大、板结“腰线”,则采取“松堆”方法处理:将堆脚0.5 m左右酒醅挖散拉细,并使用耙梳挖堆脚酒醅,待堆脚以上酒醅自然垮塌后,再将挖下酒醅均匀入堆^[21]。

2.2.4 “均撒式”接堆方式

接堆时,刮下糖化堆表面约1甑数量酒醅,并将其与待上堆酒醅均匀混合,然后将糖化堆毡松后则可开展上堆,即称为“均撒式”接堆方式。应用于酱香型白酒一、二轮次酒酿造表现出较好效果,堆积发酵过程中温度呈现“先慢后逐步快速上升”的趋势,可有效规避传统工艺接堆处易产生“腰线”的问题^[42]。

此外,除上述堆积发酵异常处置措施,针对个别堆积发酵异常较轻微的问题,在生产酿造实践过程中,生产技术人员还采取了不同于上述的处置措施:①堆积发酵后,当糖化堆“冷心”酒醅占比不大时,则在入窖期间,将“冷心”酒醅单独分离出来,待其余酒醅入窖后,再将其置于上层并暂不开展封窖,当窖池上层酒醅自然升温达到一定条件后,即刻开展封窖,俗称“窖内辅助升温”;②在炎热气候时,堆积发酵极易呈现“反向来温”的现象(即糖化堆酒醅的温度外层>内层,温度由外向内热传递),则采取“拖堆”生产模式,即两个毗邻糖化堆近乎同时起堆,从而减少糖化堆日酒醅覆盖量,促进酒醅网罗环境微生物。

3 总结与展望

前文对酱香型白酒糖化堆堆积发酵异常的主要类型、原因和行业内代表性处置措施进行了综述,根据上文所述表明,现目前,糖化堆堆积发酵存在的绝大部分问题,现有措施已能有效化解,应用后对酱香型白酒的产量与质量具有一定促进作用。

现阶段,研究主要聚焦于酱香型白酒酿造过程中上一轮次生产应用处置措施后对下一轮次生产的影响,如产量。然而,酱香型白酒酿造是“多次蒸煮、多轮发酵、多次取酒”的过程,轮次之间存在相互影响的关系。当糖化堆堆积发酵异常并应用处置措施后,对其完整生产年度产量、质量的具体影响鲜有报道。

除此之外,冬季低温恶劣气候时,针对酱香型白酒酿造过程中糖化堆升温难、升温慢的问题,除应用破堆移位措施调整糖化堆不同空间点酒醅分布外,主要聚焦于引入外来设备设施解决,即酒醅入堆时,在糖化堆“堆心”引入设备设施,增加“堆心”酒醅溶氧量,进而促进糖化堆堆积发酵。然而,从企业降本增效和推广应用的便捷性角度考量,引入设备设施的处置措施,在生产实践过程中推广的难度较大。

因此,在低温恶劣气候轮次:①适度提前活化高温大曲,应用于糖化堆的起堆过程,减少糖化堆堆积发酵的启动时间;②调整生产进度,减少糖化堆日酒醅覆盖量,促进酒醅网罗环境微生物;③轮次生产前,加大环境微生物的模拟,不断营造适宜酿酒有益微生物繁殖的生长环境。以上是从生产工艺维度探索解决酱香型白酒堆积发酵异常问题的几点思考,但具体实效尚需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 张健,范奇高,陆伦维,等. 浅析酱香型白酒发展现状及趋势思考[J]. 中国酿造, 2022, 41 (4): 234-238.
- [2] XU Y, JI K. Moutai (Maotai): production and sensory properties[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012: 315-330.
- [3] 陈振翔. 头部品牌走亲民路线,会加速酱酒热退潮吗?[N]. 华夏酒报, 2023-06-20 (A03).
- [4] 贵州省发改委. 《贵州省“十四五”战略性新兴产业集群发展规划》[EB/OL]. (2021-10-02). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1712495971861039851&wfr=spider&for=pc>.
- [5] 唐丽云,朱孟江. 酱香型白酒生产工艺及关键工艺原理简述[J]. 中国食品工业, 2022 (9): 101-104.
- [6] 邱声强,唐维川,赵金松,等. 酱香型白酒生产工艺及关键工艺原理简述[J]. 酿酒科技, 2021 (5): 86-92.
- [7] 韩兴林,尚柯,王德良,等. 酱香白酒堆积发酵过程中代谢风味生成规律的分析[J]. 酿酒, 2018, 45 (4): 37-44.
- [8] WANG M Y, YANG J G, ZHAO Q S, et al. Research progress on flavor compounds and microorganisms of Maotai flavor Baijiu[J]. J Food Sci, 2019, 84(1): 6-18.

- [9] 刘民万, 潘学森, 尹凤玮, 等. 酱香型白酒高温堆积工艺机理及轮次酒产酒分析研究[J]. 酿酒, 2019, 46(2): 60-64.
- [10] WANG Q, ZHANG H X, LIU X. Microbial community composition associated with Maotai liquor fermentation[J]. *J Food Sci*, 2016, 81(6): 1485-1494.
- [11] 张春林, 杨亮, 李喆, 等. 酱香型白酒二轮次堆积酒醅微生物群落与理化指标相关性研究[J]. 中国酿造, 2021, 40(11): 31-36.
- [12] 周恒刚. 酱香型白酒生产工艺的堆积[J]. 酿酒科技, 1999(1): 5-7.
- [13] WU Q, CHEN L Q, XU Y. Yeast community associated with the solid state fermentation of traditional Chinese Maotai-flavor liquor[J]. *Int J Food Microbiol*, 2013, 166(2): 323-330.
- [14] 崔利, 唐智. 试析大曲酱香型白酒“关键工艺”对其风格质量形成的影响及重要性[J]. 酿酒, 2023, 50(3): 3-5, 8.
- [15] 张德芹, 胡建锋, 吴成, 等. 酱香型白酒冬季堆积发酵过程中酒醅升温机制初探[J]. 中国酿造, 2024, 43(4): 68-73.
- [16] 涂昌华, 郝飞, 汪地强, 等. 酱香型白酒下沙、造沙轮次堆积发酵过程中酒醅温度与微生物的变化规律分析[J]. 酿酒科技, 2020(2): 60-64.
- [17] ZHANG R, WU Q, XU Y. Aroma characteristics of Moutai-flavor liquor produced with *Bacillus licheniformis* by solid-state fermentation[J]. *Lett Appl Microbiol*, 2013, 57(1): 11-18.
- [18] WU Q, KONG Y, XU Y. Flavor profile of Chinese liquor is altered by interactions of intrinsic and extrinsic microbes[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2015, 82(2): 422-430.
- [19] 邓子文, 贺子豪, 何梦雪, 等. 酱香型白酒第四轮次堆积发酵醅堆腰线微生物菌群多样性解析[J]. 中国酿造, 2023, 42(3): 53-57.
- [20] 汪地强, 陈良强, 涂昌华, 等. 酱香型白酒堆积过程腰线酒醅浅析[J]. 中国酿造, 2020, 39(9): 97-100.
- [21] 涂昌华, 袁颀, 王宗强, 等. 酱香型白酒“腰线”的成因及处理对策[J]. 酿酒科技, 2020(9): 58-60.
- [22] 袁再顺, 胡萍, 陈乾, 等. 破堆移位解决酱香酒冬季堆积发酵异常研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 14-19.
- [23] 黄永光, 湛永前, 吴广黔, 等. 酱香白酒堆积发酵过程酒醅中酵母菌的分析研究[J]. 酿酒科技, 2013(6): 8-13.
- [24] 路虎, 张飞, 罗刚, 等. 酱香型白酒糙沙轮次成熟糖化堆的剖析[J]. 酿酒科技, 2021(6): 60-64.
- [25] 邱声强, 唐维川, 赵金松, 等. 酱香型白酒生产工艺及关键工艺原理简述[J]. 酿酒科技, 2021(5): 86-92.
- [26] 李潮云, 卢君, 冯海燕, 等. 酱香型白酒二轮次堆积酒醅酵母菌数量与理化指标变化分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(2): 48-52.
- [27] 宗加权. 茅台酒产地气候特征及气候变化趋势分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [28] 王莉. 贵州茅台酒五维品质表达体系构建的案例分析[J]. 宏观质量研究, 2023, 11(4): 1-11.
- [29] 罗太江, 王军, 冯沛春. 酱香型白酒堆积发酵工艺的管理研究分析[J]. 酿酒科技, 2020(7): 71-74.
- [30] 万勇, 张兆丰, 熊翔, 等. 酱香型不同轮次发酵酒醅理化因子变化规律研究[J]. 中国食品工业, 2022(4): 107-111.
- [31] 刘宏基, 黄晓芬, 余有贵, 等. 不同高度堆积发酵酱酒醅主要理化指标的比较研究[J]. 中国食品工业, 2023(8): 111-113, 124.
- [32] 杨萍, 胡萍, 樊敏, 等. 酱香型酒曲及窖内酒醅挥发性成分的分析[J]. 中国酿造, 2018, 37(11): 166-171.
- [33] 王邦坤, 张维山. 北方大曲酱香酒云门陈酿高温堆积发酵工艺探讨[J]. 酿酒, 2019, 46(3): 40-42.
- [34] 黄治国, 曾永仲, 扶勇, 等. 酱香型白酒轮次堆积发酵新工艺的研究[J]. 酿酒科技, 2023(1): 61-64.
- [35] 杨刚仁, 路虎, 陈叶琴, 等. 竹篓溶氧器在酱香酒堆积发酵中的应用[J]. 酿酒科技, 2020(9): 78-82.
- [36] ZHAO H B, HUO Y Y, YANG G R, et al. Effect of stainless steel oxygen dissolver in the piling fermentation of sauce-flavor *Baijiu*[J]. *Food Sci Technol Res*, 2024, 31(1): 63-74.
- [37] 梁涿, 范宏筠, 税梁扬, 等. “FD工艺”对酱香型白酒堆积过程的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 181-188.
- [38] 税梁扬, 梁涿, 周帅, 等. “FD工艺”对酱香型白酒堆积过程真菌群落结构和酒体品质的影响[J]. 酿酒科技, 2022(9): 25-32.
- [39] 张维山, 张宗举, 孟宪江, 等. 堆积发酵过程中酒醅倒堆试验工艺总结[J]. 酿酒, 2013, 40(5): 86-88.
- [40] 卓毓崇, 蒋英丽, 王会, 等. 破堆移位降温技术对酱香型白酒出酒率的影响[J]. 酿酒科技, 2014(11): 55-57.
- [41] 杨飞, 沈才洪, 张洪远, 等. 酱香型白酒糙沙轮次堆积新工艺研究[J]. 酿酒科技, 2012(4): 35-38.
- [42] 涂华彬, 胡峰, 杨刚仁, 等. 接堆方式对酱香型白酒酒醅发酵质量的影响[J]. 酿酒, 2019, 46(4): 78-81.