白酒生产过程中窖泥品质研究进展

宋先闯[1,2],胡建祥[2],胡景辉[1,3],孟新莉[2],郝丽刚[4],张 英[5],张娇娇[1,3],何猛超[1,3],韩兴林[1,3]

(1.中国食品发酵工业研究院有限公司,北京 100015;2.陕西柳林酒业集团有限公司,陕西 宝鸡 721406;
3.国家酒类品质与安全国际联合研究中心,北京 100015;4.新疆农业大学 食品科学与药学学院,新疆 乌鲁木齐 830052;
5.四川轻化工大学 生物工程学院,四川 宜宾 644000)

摘 要:窖泥是白酒生产中的重要生产要素,在众多白酒香型的生产中都有窖泥的存在,在白酒生产过程中发挥重要作用,其微生物群落种类、结构对酒体风味具有重要影响。近年来,随着科学技术的不断发展,对于白酒窖泥品质的研究也在不断深入,该文从窖泥的来源、应用、作用、标准、制作等方面进行综合介绍,并对窖泥老化、钙化等退化的原因和改善措施的研究进展进行了相关介绍。以期帮助广大白酒从业者和爱好者了解窖泥,同时为酿酒行业工作者提供借鉴与参考。

关键词:白酒;生产;窖泥;微生物;人工窖泥;老化

中图分类号:TS261 **文章编号**:0254-5071(2025)10-0001-10 doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.10.001

引文格式:宋先闯,胡建祥,胡景辉,等. 白酒生产过程中窖泥品质研究进展[J]. 中国酿造,2025,44(10):1-10.

Research progress on the quality of pit mud of *Baijiu* production

SONG Xianchuang[1,2], HU Jianxiang[2], HU Jinghui[1,3], MENG Xinli[2], HAO Ligang[4], ZHANG Ying[5],
ZHANG Jiaojiao[1,3], HE Mengchao[1,3], HAN Xinglin[1,3]

(1.China Research Institute of Food and Fermentation Industry Co., Ltd., Beijing 100015, China; 2.Shaanxi Liulin Liquor Group Co., Ltd., Baoji 721406, China; 3.National International Joint Research Center for Wine Quality and Safety, Beijing 100015, China; 4.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 5.School of Bioengineering, Sichuan University of Light Chemical Technology, Yibin 644000, China)

Abstract: Pit mud is an important production element of *Baijiu*, it is present in the production of many flavor-types *Baijiu* and plays an important role in the production process of *Baijiu*. The types and structures of microbial communities in pit mud have a significant impact on the flavor of *Baijiu*. In recent years, with the continuous development of science and technology, research on the quality of pit mud in *Baijiu* production has also been deepening. In this paper, the pit mud was comprehensively introduced from its source, application, role, standards, production and other aspects, and relevant research progress on the causes of pit mud aging, calcification and other degradation and improvement measures was also presented, to help the majority of *Baijiu* practitioners and enthusiasts to understand the pit mud, and at the same time provide reference and reference for workers in the brewing industry.

Key words: *Baijiu*; production; pit mud; microorganisms; artificial pit mud; aging

白酒是中国国酒,在中国的食品工业中占有举足轻重的地位,是中国最受欢迎的酒精饮料[1]。2023年,全国白酒行业销售总收入为7 563亿元,利润高达2 328亿元,占酿酒行业的88.6%,其中浓香型白酒作为白酒产销量最大的白酒香型,是白酒的典型代表,GB/T 10781.1—2021《白酒质量要求 第1部分:浓香型白酒》中对浓香型白酒定义为“以粮谷为原料,采用浓香大曲为糖化发酵剂,经泥窖固态发酵,陈酿、勾调而成”,可见泥窖对于浓香型白酒的风格特征形成具有举足轻重的作用[2]。除此之外,如酱香型白酒的“泥底砖窖”、凤香型白酒的“新泥窖”等多种香型白酒的生产中均有“窖泥”参与,为其风格品质的形成发挥重要作用。

白酒的发酵是一个涉及原料消耗及产物形成的复杂过程,并伴随着微生物的生长代谢,窖池中的微生物群落和其他因素会直接或间接地影响白酒品质的变化[3]。在此过程中,窖泥作为窖池构成的重要组成部分,其内部微生物群落结构对白酒风味品质的形成具有重要作用,同时伴随着发酵的进行窖泥内部微生物群落也会发生一系列的演替、缓慢富集和淘汰,形成窖泥中特有的微生物体系[4]。研究人员发现窖泥中的酿造功能菌(己酸菌、甲烷菌等)对酒质的提高具有巨大的作用,但长时间生产实践发现,部分窖泥会出现老化、钙化等问题,成为了制约白酒品质进一步提升的瓶颈[5]。

收稿日期:2024-11-04 **修回日期**:2025-02-24

基金项目:国家重点研发计划传统酿造食品智能制造技术研究及示范项目(2022YFD2101205)

作者简介:宋先闯(1999-),男,硕士研究生,研究方向为发酵工程。

***通讯作者**:韩兴林(1983-),男,高级工程师,博士,研究方向为发酵工程。

在白酒的生产过程中,窖泥作为发酵的载体,其品质直接关系到白酒的质量和风味。所以本文将围绕近年来白酒生产窖泥品质的研究进展,从窖泥的介绍、微生物菌群结构、窖泥老化以及退化等问题进行深入介绍,以期为酿酒工业的可持续发展提供有益参考。

1 白酒窖泥

中国白酒历史悠久,酒精浓度高,风味独特,与威士忌、白兰地、伏特加、杜松子酒和朗姆酒并称为世界六大蒸馏酒。与其他蒸馏酒不同的是中国白酒采用固态发酵,它需要蓄积糟醅进行发酵的容器,如酱香的泥底砖窖,浓香的泥窖,清香的地缸等。浓香型窖池为泥底泥壁,四壁及窖底是黄土黄泥,标准窖池容积14～20 m^3,窖池深度1.8～2.0 m,长方形,宽度控制在1.5 m左右,每个窖池可投粮12～15 t;清香型白酒为地缸发酵,一般直径为0.7～0.9 m,高为1.0～1.6 m,相邻两缸的中心距为1.0 m;酱酒的窖池为石壁泥底,四壁由条状的砾岩石、赤砂岩和黏土砌成,窖底为红土,标准窖池长约4.0 m、宽约2.8 m、高约3.0 m,每个窖池可投粮18～20 t。

窖泥是一种用于封窖、窖壁和制作窖底的泥土,富含微生物,水分、腐殖质含量高且含氧量低,一方面可作为盛装发酵糟醅的容器,另一方面也是众多功能性微生物生长繁殖的栖息场所[6]。窖泥的历史可以追溯到数千年前,在河南贾湖遗址出土的陶器内壁上,便发现了酒类挥发后的酒石酸,这是目前考古界所挖掘出的最早的酿酒起源,同时也是有据可考的,酒与泥最早的“联结”[7]。在白酒发酵过程中,糟醅、窖泥与窖泥微生物形成一个复合有机整体,期间不断进行着复杂的生物化学反应,产酒的同时不断积累风味前体物质,从而赋予白酒特殊的风格。

1.1 窖泥种类

中国白酒因生产工艺、制曲技术、地理环境等差异而呈现出不同的风格特征,建国以后经过系统性总结不同白酒生产工艺和风格特征,将中国白酒分为四大基础香型(酱香型、浓香型、清香型、米香型)和八大小香型(兼香型、豉香型、凤香型、药香型、特香型、芝麻香型、老白干型和馥郁香型)[8],其中在浓、酱、凤、芝麻、兼、特和药等白酒香型中均有窖泥参与到白酒发酵过程中,对其风格品质的形成具有重要影响[9]。

1.1.1 浓香型白酒窖泥

作为四大香型之一的浓香型白酒,是中国产销量最大的白酒香型,其独特的风格品质受到广大白酒消费者喜爱,而这一切与浓香型白酒的“泥窖固态发酵”生产工艺息息相关。经长期生产实践证明,生产优质的浓香型白酒,窖泥是基础,曲药是动力,工艺是关键[10]。浓香型白酒窖泥中栖息着大量以乳酸菌、己酸菌及甲烷菌等为主的厌氧菌群。己酸菌代谢产生的己酸是合成己酸乙酯的前体物质,对浓香型白酒的风格形成具有决定性的作用,而且以己酸菌为主的培养液可用于浓香型白酒的灌窖、窖池保养、人工窖泥培养以及酯化液的制作。以酵母为主的窖泥微生物能够分解酒液中的复杂有机物,产生丰富的氨基酸和多酚类物质,为酒体起到增香和提鲜的作用,使得浓香型白酒具有独特的鲜香口感[11]。正所谓“千年老窖万年糟,酒好全凭窖池老”,窖龄越长的窖泥,经过长时间的生产活动使窖泥内形成了一个庞大且稳定的微生物群落结构,成为一个独特的酿酒微生态系统,使酒体香气和风味呈现独特风格,为酒体赋予深厚的底蕴和层次感。封窖的窖泥在使用前需要进行人工培养,会添加一些特定的营养物质,促进有益微生物的繁殖和代谢,从而增加己酸乙酯等香味物质的生成。正是窖泥微生物菌群让浓香型白酒形成以己酸乙酯为主体香味成分与独特口感[12]。

1.1.2 酱香型白酒窖泥

酱香型白酒生产过程中也会用到部分窖泥,其发酵容器-石窖泥底是酱香型白酒的特色发酵容器,大体可以分为窖底泥和封窖泥两部分。窖底泥中包含大量微生物,可以提供丰富的风味物质。封窖用泥是在酒醅完全入窖后,用窖泥完全覆盖住窖池最上方,要求用无石块、含沙量低、腐殖质少的黄色粘性泥土,下沙、糙沙时使用10%左右的老泥和90%左右的新泥混合。酱香型白酒原酒根据其风格的不同通常分为酱香、醇甜和窖底三种酒体,可见窖池底部窖泥对酱香型白酒风格起到重要作用。

1.1.3 凤香型白酒窖泥

凤香型白酒酿造工艺中,通常采用土暗窖发酵,其窖泥一般呈黄褐色、粘性较高,富含矿物质和微量元素,能够吸收酒中的杂质和异味,使白酒更加纯净和醇厚,主要起到净化和平衡酒质的作用[13]。与浓香型白酒追求老窖泥不同的是,凤香型白酒窖泥在每年需要去掉窖内壁、底的老窖皮泥,再换上新窖泥,以限制窖泥中己酸菌的发展来控制成品酒中己酸乙酯的含量,从而保持凤香型酒的典型风格特征[14]。

1.1.4 其他香型窖泥

芝麻香型白酒发酵容器为泥底砖(或石)窖,区别于浓香型白酒的泥窖发酵,与酱香型白酒的碎石窖或条石窖(窖底为泥)具有相似性。窖池底部使用的人工窖泥,融合了浓香型白酒的风格特点,同时较高含量的己酸乙酯让其风味区别于酱香型白酒[15]。

兼香型白酒生产窖池的设计充分考虑了酱浓结合的特点。其代表品牌白云边酒的窖池为窖壁下部三分之一用黄泥垒成,上部三分之二用砖砌成,窖底用优质窖泥铺满[16]。目前,新窖池改为水泥,窖壁直达窖底,窖底是泥底,更加偏向于酱香型窖池特点[17]。

由于泥窖是浓香型白酒生产工艺的典型特点,且行业

内所讲窖泥通常指代浓香型白酒窖泥，所以在本文后续介绍中如无特殊说明即通指浓香型白酒窖泥。

1.2 地理差异

窖泥制作一般是就地取材，所以也就造就了不同地区的窖泥差异。中国白酒十二香型代表白酒分布见图1。浓香型白酒是中国分布最广的白酒香型之一，生产企业在国内众多省市均有分布，目前浓香型代表企业更多位居于四川。由于原料、地理环境差异等因素的影响，使不同地区白酒的微量成分具有多样性，导致白酒风格上各有特点。在1992年，沈怡方首先提出“四川”和“苏、皖、鲁、豫”两个地域所产浓香型白酒的风味区别，并上升到流派高度[18]。

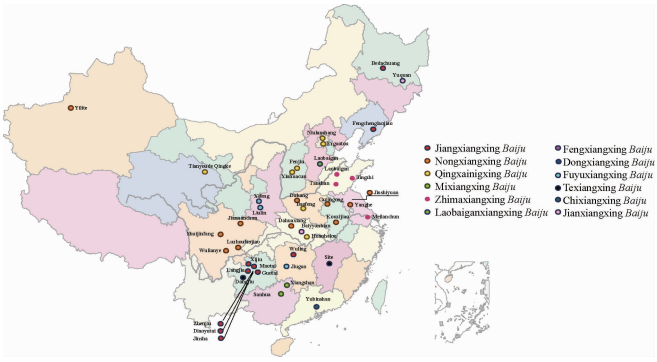

图1　中国白酒十二香型代表白酒分布图

Fig. 1 Distribution map of the 12 flavor types of Chinese *Baijiu*

正如“一方水土养一方人”，大量研究也证明不同的地理环境显著影响着窖泥的质量。如李维青[19]提出，地域生态环境的差异会导致酿酒微生物群落的多样性，进而使得所产出的浓香白酒呈现出微妙的或显著的风格差异；程伟等[20]划分了白酒以流域为纽带所形成的聚集产区，研究了江淮地区自然环境对柔和型白酒品质的影响，明确了其地域优势。窖泥理化与所处的地理环境也具有一定相关性。黄治国等[21]比较了宜宾、泸州和邛崃3个地区窖泥的理化指标，发现宜宾和邛崃的窖泥pH值及水分、腐殖酸和有效磷含量均显著低于泸州窖泥，而邛崃窖泥的总糖和总酸含量则相对高于宜宾和泸州的窖泥。

2 窖泥微生物

窖泥的发展与酿酒行业的发展紧密相关，众多白酒行业人员先后对窖泥各方面进行了深入研究。20世纪80年代开始对窖泥中所含无机及微量元素、氨基酸含量对酒质的影响进行研究[22]；20世纪90年代至21世纪初，主要对人工窖泥老化退化的研究、窖泥中有机酸含量对酒质的影响及窖泥功能菌的相关研究[23]；近10年来，逐渐注重于对窖泥微生物群落结构及其应用的研究[24]。至今为止，窖泥作为酿酒微生物的重要载体，其质量优劣在很大程度上取决于其微生物群落组成结构及物种多样性。

1964年轻工部茅台试点组在茅台窖池底部的窖泥中发现了产丁酸和己酸的梭状芽孢杆菌，最终证明了己酸乙酯是窖底香味成分，进而确定了己酸乙酯是浓香型白酒的主体香味成分，由此拉开了窖泥微生物研究的序幕[24]。窖泥在长期生产发酵过程中形成了一个独特的微生物群落，是白酒发酵过程中的重要微生物菌种来源之一。窖泥内包含着丰富的微生物种类，包括细菌、古菌、放线菌和真菌（根霉菌、酵母菌、曲霉菌）等[25-26]，主要微生物及功能见表1。霉菌和酵母菌主要来自于酒曲，在发酵前期发挥作用，窖泥微生物以兼性厌氧细菌和绝对厌氧细菌占据优势地位，主要在发酵后期产生作用[27]。这些微生物在发酵过程中起着非常重要的作用，被称为酿酒“微生物黄金”。通过测序研究发现，窖泥中的微生物主要以细菌和古菌为主，归属于85个科和225个属，优势菌门为厚壁菌门（Firmicutes）、广古菌门（Euryarchaeota）和拟杆菌门（Bacteroidetes），其中Firmicutes菌群是窖泥产香生酸的关键微生物菌群，其丰度与窖泥质量息息相关。主要的优势菌属包括有梭菌属（*Clostridium*）、芽孢杆菌属（*Bacillus*）、瘤胃球菌属（*Ruminococcus*）、互营单胞菌属（*Syntrophomonas*）等[28]。

表1　窖泥中主要微生物及功能[29]

Table 1 Main microorganisms and their functions in pit mud

分类	主要种类及功能
细菌	以厚壁菌门中的梭菌属和乳酸杆菌属为主；产酸和产香
古菌	甲烷杆菌及甲烷八叠球菌属为主；促进窖泥生香和老熟
霉菌	曲霉、根霉等；起糖化、蛋白酶活分解和液化作用
酵母	产酯酵母、酿酒酵母为主；产酒精、产酯作用
放线菌	链霉菌属为主；产次生代谢产物，具有生物调控作用，通过调节其他菌种代谢，从而影响风味

此外，窖泥微生物随着时空变化呈现规律性的演替，不同窖龄和位置的差异都会导致微生物种类的差异。老窖泥中微生物的数量和种类多于新窖，老窖泥的优势菌群主要是厚壁菌门和子囊菌门，新窖泥中则以乳酸菌属为主；从窖池的顶部到底部，微生物的数量呈逐渐增多的分布规律[30]。此外，研究还发现老窖泥中的古菌、梭状芽孢杆菌和嗜热微生物含量较高，而老化窖泥中真菌和厌氧性粘菌较多。窖泥中的微生物种类繁多，个体和共生关系仍需要进一步研究。了解窖泥微生物的特点和变化有助于更好地理解酿酒过程中微生物的功能和作用，并进一步优化酿造工艺。

2.1 细菌

窖泥中微生物主要以细菌为主。研究发现乳酸杆菌属（*Lactobacillus*）及己酸菌属（*Caproiciproducens*）在窖泥细菌微生物群落中占绝对优势[31]。乳酸菌是白酒发酵后期酒醅的主要功能微生物，其生长代谢所产生的乳酸是浓香型白酒的重要风味物质之一，还被认为是新窖泥中主要微生物，丰富度可达到80%以上，产己酸菌主要包括梭菌属（*Clostridium*）、芽孢杆菌属（*Bacillus*）、假单胞菌属（*Pseu-*

domonas)等[32]。芽孢杆菌属为窖泥中可分离培养的主要微生物,因其种类繁多和普遍存在等因素,对浓香型白酒不同风格特征的形成起到了关键作用;梭菌属丰度可达到细菌相对丰度的40%左右,被称作为老熟窖泥中典型微生物,显著影响着窖泥的质量,其代谢产生的己酸、丁酸和乙酸等短链脂肪酸对浓香型白酒以己酸乙酯为主体风格特征有着极其重要的贡献[33];产甲烷菌是厌氧发酵的末端微生物,在窖泥中的含量较高,并且生长代谢很是活跃,但更多的是其与其他微生物之间的互营关系对浓香型白酒的质量具有重大意义。

2.2 酵母

酵母菌在窖泥内的真菌占据主导地位,主要有假丝酵母属(*Candida*)、毕赤酵母属(*Pichia*)、丝孢酵母属、酿酒酵母属(*Saccharomyces*)等,主要功能是参与风味物质的形成[34]。假丝酵母是一类能形成假菌丝、不产生子囊孢子的酵母,在发酵过程中假丝酵母产酒精能力低于酿酒酵母[35];产酯酵母可以利用自身的酯化酶催化醇、酸反应生成多种具有香味的酯类物质,也可以通过醇酰基转移酶转移酰基至醇类生成酯,产酯能力强的酵母有:汉逊酵母属、毕赤酵母属等[36],但在40年窖龄的窖泥中很难检测到酵母菌。

2.3 霉菌

霉菌在白酒生产发酵中能够产生大量的葡萄糖淀粉酶,可以将原料中的淀粉降解为还原糖供其他菌种直接利用,起到糖化的作用。以子囊菌门、担子菌门和毛霉亚门居多,新窖泥中的优势菌属是单端胞属,老窖泥中的优势菌属是青霉属[37]。

2.4 其他

浓香型白酒窖泥中大多数放线菌都是有益微生物,是许多酶、抗生素和维生素等物质的来源[38]。目前对浓香型白酒窖泥中放线菌的研究,主要集中在放线菌的多样性、放线菌分离与鉴定、放线菌产酶分析、放线菌代谢成分分析等[39]。甲烷菌也是参与浓香型白酒发酵过程的重要微生物群,它们可以显著消除“氢抑制”作用,实现“种间氢转移”,而且窖泥中甲烷菌的存在代表着窖泥菌群代谢链的完善,是窖泥老熟的标志[40]。

2.5 己酸菌与其他功能菌

己酸菌是窖泥中最重要的功能菌,以乙醇、乙酸、葡萄糖、*D*-半乳糖醇和乳酸为碳源发酵生成己酸。己酸菌大多为嗜热菌,可在80 ℃条件下存活、30～40 ℃条件下适宜生长,最佳pH值为6.8或接近中性,己酸菌主要分布于梭菌属、芽孢杆菌属、假单胞菌属等[41]。己酸菌除了产生己酸外,其代谢产物还有丁酸、戊酸等其他微量成分。己酸菌的发现始于BARKER H A[42]在研究甲烷菌时发现,其形态呈现鼓槌状且产芽孢,我国对己酸菌的研究发现,己酸乙酯是浓香型白酒的主体香味物质。己酸的生成过程大概可分为三步,分别为乙酰辅酶A的生成、丁酰辅酶A的生成、己酰辅酶A的生成[43]。目前研究者们对己酸菌的研究多集中在己酸菌的分离鉴定、己酸代谢途径分析、己酸菌的菌株改良、发酵条件优化以及己酸菌复配液在窖泥养护中的应用。己酸菌大多是严格意义上的厌氧菌,筛选难度较大,且培养成本较高,所以对纯产己酸细菌的研究报道较少,同时单一的己酸菌株产己酸能力较弱,而与其他菌种混合培养可以显著提高己酸菌产酸能力,如己酸菌与甲烷菌、放线菌、丁酸菌、酵母菌等的混合培养。

2.5.1 己酸菌与酵母

酵母在生长代谢过程中消耗氧气和产生乙醇,有利于发酵和酯化反应的进行。酵母和产己酸菌共培养可以促进合成链向丁酸的转化,从而增加己酸的产量。酵母代谢产生的酯化酶还能在一定程度上酯化己酸,缓解过量己酸对产己酸菌的反馈抑制作用,并为己酸乙酯的合成提供有利条件。克雷伯氏梭菌(*Clostridium klebsiella*)8022与酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)共同培养可使己酸产量增加12.5%[44]。

2.5.2 己酸菌与梭状芽孢杆菌

在主要的产己酸菌微生物中,一种梭菌的代谢产物是另一种梭菌生长繁殖利用的底物。如扬氏梭菌(*Clostridium ljungdahlii*)同化CO_2和H_2,产生可用于*C. kluyveri*发酵的前体物质-乙酸和乙醇,从而生产己酸。WEIMER P J等[45]将奶牛瘤胃中的混合菌与*C. kluyveri*共同培养,己酸的产量达到6.1g/L。

2.5.3 己酸菌与甲烷菌

产己酸菌和甲烷菌之间存在着种间氢的转移[46]。产己酸菌通过厌氧呼吸产生的H_2和CO_2可以被甲烷菌用来生产甲烷。这降低了氢气分压,减少了反应的自由能,使产己酸菌能够顺利地将乙醇氧化成乙酸。此外,消耗氢的甲烷菌,如奥氏甲烷芽孢杆菌(*Methanobacillus omelianskii*),在细胞中含有甲基酶系统和四氢叶酸,当这些甲烷菌死亡时,释放的四氢叶酸可以为己酸生产菌提供某些生长因子,促进产己酸菌的增殖。

2.5.4 己酸菌和放线菌

放线菌是固氮微生物,与产己酸菌共同培养时提供氮源。放线菌产生的蛋白酶将蛋白质水解成氨基酸,为产己酸菌的生长和代谢提供营养。淀粉酶和纤维素酶将一些淀粉和纤维素等高分子物水解成小分子物质,通过细菌和酵母的作用,产生低分子物质,如乙醇、乙酸和乙酸乙酯,从而丰富了中国白酒的风味。同时,放线菌代谢产生的黑色素对己酸的产生也有一定的促进作用[47]。部分文献中筛选的窖泥微生物菌株如表2所示。

表2 窖泥微生物菌株

Table 2 Microbial strains in pit mud

序号	菌株名称	形态特征	己酸含量/(g·L^{-1})	主要理化条件	参考文献
1	球形赖氨酸芽孢杆菌（*Lysinibacillus sphaericus*）	兼性厌氧菌，杆状，鼓槌状，游动性好，产芽孢	1.14	未提起	[48]
2	*Corynebacterium provencense*	兼性厌氧菌，长杆状，有鼓槌	1.8	未提起	[48]
3	瘤胃菌科（Ruminococcaceae）CPB6	厌氧、短棒状、产芽孢、革兰氏阳性	16.6	pH 5.0～6.5；温度30～40 ℃	[49]
4	水原拉梅尔芽胞杆菌（*Rummeliibacillus suwonensis*）3B-1	兼性厌氧、杆状、革兰氏阳性、产芽孢	4.06	适宜pH 7；适宜温度33～37 ℃	[50]
5	克氏梭菌（*Clostridium kluyveri*）A-3	呈杆状、芽孢端生或近端生	9.77	适宜pH7，适宜温度37 ℃	[51]
6	速生梭菌（*Clostridium celerecrescens*）E-6	呈杆状、芽孢生成，革兰氏阳性	9.42	适宜温度35 ℃	[52]
7	*Clostridium kluyveri*	呈杆状、产芽孢、革兰氏阳性	4.36	培养温度37 ℃，pH值为6.5	[53]

3 人工窖泥

正所谓“千年老窖万年糟，酒好需得窖池老”，自然老熟的窖池是经过多年的使用，酒糟和窖泥的不断接触、互相渗透老化，是香味物质、微生物群落、营养物质等成分不断积累综合作用的结果，有利于己酸菌的生长和原料的发酵[54]。从表3中微生物随窖龄的变化可知，在周期性的发酵模式影响下，窖泥菌群各种菌属之间至少需要25年复杂的合作与竞争作用，菌群结构才基本达到稳定状态，也就是业内所说的老熟状态，此时窖泥内微生物菌群数量及种类丰富且稳定，其酿造的白酒也越香醇[55]。由于窖泥的老熟需要漫长的时间，不能满足当下生产要求，从而有了人工窖泥的研究。

表3 微生物随窖龄的变化

Table 3 Changes of microorganisms with cellar age

变化	参考文献
5、10和20年窖龄及不同空间位置窖泥的原核和真核微生物群落结构、差异微生物和微生物与理化因子之间的关系进行研究，发现5年的窖泥原核微生物和真核微生物多样性均高于10年和20年窖龄的窖泥，总体上窖龄长的窖泥质量高。在10年和20年窖龄上层窖泥中，微生物*Lactobacillus*丰度高、有效磷含量偏低说明了窖龄长的窖池上层窖泥质量存在退化现象。	[56]
窖龄从1年增加到25年，窖泥微生物菌群丰度逐渐增加，而25年和50年窖龄的窖泥微生物菌群结构最为相近且无明显差异，但其多样性和丰富度明显高于新窖泥	[57]
不同窖龄窖泥中6种矿物质元素镁、铝、钾、钙、锰、铁的含量进行测定，研究发现不同窖龄窖泥6种矿物质元素中铝、铁含量最高，3种窖龄窖泥中10年窖泥的6种矿物质元素含量最高。	[58]
宋河酒业的窖泥水分、速效钾和有机质含量均随窖龄的增加而不断增加，在窖龄3～15年内，随着窖龄的增加，窖泥pH值、有效磷和钙含量先增加后减小，铵态氮含量总体呈增加的趋势，具体表现为先增加后减少再增加的趋势。	[30]

3.1 人工窖泥

人工窖泥是通过筛选出老窖泥中特异的功能微生物，再与其他材料（如黄土、老窖泥和豆粕等）按比例混合，在厌氧环境下堆积发酵30～60 d。在此过程中，通过特异微生物以及所加材料的多重作用，快速生成适合白酒酿造的环境，大大缩短了窖泥自然老熟的时间。MU Y等[59]研究发现，在人工窖泥中添加强化大曲可以改变其原核微生物群落，从而提升人工窖泥的风味品质。鲁少文等[60]在人工窖泥中添加前期研究发现的新型己酸菌可以大大缩短窖泥自然成熟的时间。

浓香型白酒人工窖泥是通过人工的方式模拟自然老熟过程中的窖泥效果，以提高白酒的口感和香气。它是浓香型白酒生产中的重要工艺之一，能够有效地提高白酒的品质和陈化速度。

3.2 人工窖泥制备

窖泥作为酿造过程中发酵容器的制作材料，本身是一个天然培养基，为微生物的生长繁殖提供营养物质，所以人工窖泥的制作首要条件就是满足微生物的生长繁殖。目前人工窖泥的制作以优质黄泥与窖皮泥、黄水、大曲粉、泥炭、功能菌液、无机盐（N、P、K、Na、Mg等元素化合物）等基础物料为主。黄水富含多种微生物种群，并且含有丰富的营养物质，是微生物生长的重要来源；利用泥炭中较高含量的有机质、腐殖酸及其他营养成分，提高窖泥保水能力、腐殖质含量、营养成分，并最终将提高窖泥功能菌—己酸菌数量。

表4 不同酒厂窖泥配方

Table 4 Formula of pit mud from different wineries

名称	配方
陕西某浓香酒厂	白苦土，磷酸氢二钾，磷酸二氢钾，醋酸钠，磷酸铵，豆饼粉，酒糟粉，窖泥功能菌，酒精，保水剂，大曲粉，竹签（10 cm），细麻绳
山东某浓香型酒厂	黄土、窖皮泥、老窖泥、干制功能菌、养窖液、中温大曲粉、豆饼粉（熟）、95%vol酒精、25%vol酒尾、出窖鲜粮醅、N/P/K辅料、保水剂、液体酵母菌、碳铵

续表

名称	配方
河北某浓香型酒厂	黄土、干制活性窖泥功能菌、生香酵母、酯化红曲菌、磷酸氢二钾、醋酸钠、硫酸镁、复合氮肥、豆饼粉、酒糟、大曲粉、15%vol酒尾、黄水、窖皮泥
四川某多粮浓香酒厂	黄粘土、功能菌液、大曲粉、黄水、酒尾、母漕、优质老窖泥、豆饼粉、软化水、麻绳、粮糟
四川某单粮浓香酒厂	黄土、泥炭、种子泥、酒醅、酒尾、大曲粉、黄豆粉、骨粉、猪血、复合菌液
山东某浓香型酒厂	黄土、泥炭、大曲粉、二级酒、骨粉、白糖、黄豆粉、蚕蛹、酒醅、猪血、酒尾、糯米、种子泥、己酸菌液、黄水(煮沸)

从表4不同酒厂的窖泥配方分析来看,人工窖泥的原料非常复杂,只有基本营养物质还不行,需要因地制宜。如北方的水质较硬,在制作过程中就需要添加软水剂,这就导致各地酒厂人工窖泥配方的差异。

3.2.1 黄土

浓香型白酒生产工艺特点为“泥窖固态发酵”,以泥窖为发酵容器,是影响其风味的重要因素之一。传统工艺修建窖池时不添加任何粘结剂,只利用土壤自身的机械物理特性维持整个窖池的刚性[61]。目前大多数企业选择黄泥作为原料土,因其具有粘性大、含沙量低、保浆性好等物理特性。特别是不能用碱性较大的淤泥,碱性物质会与窖池内的酸发生反应形成盐类物质从而加速窖泥的老化。然而黄泥更多的分布在四川宜宾、泸州等地,导致北方企业土壤质量参差不齐,只是最多通过感官特征来区别好与坏,没有科学的数据作为参考。黄裕隆等[62]对4个地区浓香型白酒企业筑窖原料土的7个指标进行研究分析,结果表明不同地区筑窖用土有明显差异,渗透系数与含砂率呈显著正相关,与塑性指数、干密度呈显著负相关。

3.2.2 黄水

在白酒酿造过程中,窖池底部会出现棕黄色粘稠液体—黄水,又称黄浆水,这是在微生物的作用下,入窖酒醅中的淀粉、还原糖、酒精、单宁等大分子以及各类风味物质随水分沉积在窖池底部形成的[63]。研究发现,通过浸泡或喷洒黄水的酒醅,优质白酒的比例会更高,众多企业采用以黄水为原料制备酯化液来实现回收利用[64]。黄水的各类风味化学成分见表5。使之成为一种多元组分的高营养价值的液体。黄水当中富含多种营养物质以及稳定微生物发酵体系,不仅可以用于强化窖池当中的功能菌株、还能平衡窖泥整体的厌氧体系,让酒体产生更好的口感[65]。

表5 黄水部分理化指标及挥发性风味物质[66]

Table 5 Some physicochemical indicators and volatile flavor substances of Huangshui

项目	含量范围	项目	含量范围	项目	含量范围
pH	3.79～3.85	乳酸/(mg·100 mL^{-1})	4 066～7 889	异丁醇/(mg·100 mL^{-1})	0.25～4.33
COD/(mg·mL^{-1})	25 000～45 000	乙酸/(mg·100 mL^{-1})	288.88～520.53	异戊醇/(mg·100 mL^{-1})	2.34～55.43
BOD/(mg·mL^{-1})	10 000～20 000	己酸/(mg·100 mL^{-1})	13.91～242.88	β-苯乙醇/(mg·100 mL^{-1})	3.92～33.00
含水量/%	84.68～88.77	丁酸/(mg·100 mL^{-1})	65.08～169.57	2,3-丁二醇/(mg·100 mL^{-1})	2.39～52.00
酒精度/%wol	3.2～5.3	乙醛/(mg·100 mL^{-1})	1.291～4.056	乙酸乙酯/(mg·100 mL^{-1})	4.77～64.52
总糖/%	4.61～5.96	乙缩醛/(mg·100 mL^{-1})	2.60～2.74	乳酸乙酯/(mg·100 mL^{-1})	21.14～293.20
淀粉/%	3.07～3.15	异戊醛/(mg·100 mL^{-1})	1.45～1.58	丁酸乙酯/(mg·100 mL^{-1})	0.93～15.16
还原糖/%	2.65～2.87	糠醛/(mg·100 mL^{-1})	1.54～1.55	戊酸乙酯/(mg·100 mL^{-1})	0～0.607
总固形物/(g·100 mL^{-1})	1.36～17.5	甲醇/(mg·100 mL^{-1})	5.70～10.14	己酸乙酯/(mg·100 mL^{-1})	2.62～52.02
总酸/(g·L^{-1})	23～38	正丙醇/(mg·100 mL^{-1})	2.36～88.43	辛酸乙酯/(mg·100 mL^{-1})	0.89～10.20
总酯/(g·L^{-1})	1.3～2.7	正丁醇/(mg·100 mL^{-1})	1.52～16.23		

3.2.3 大曲粉

大曲粉内含大量的酵母、霉菌、细菌和淀粉。研究表明,这些成分在培养窖泥的初期起到了接种与升温的作用,并且大曲微生物也具备产己酸能力的微生物[67]。随着窖泥培养过程的进行,微生物的死亡会形成菌体自溶物,淀粉也会逐渐转化为腐殖质,两者都为土壤中的其他微生物提供重要的养分。

3.2.4 功能菌液

功能菌液在人工窖泥中的作用主要体现在丰富微生物数量、提高酯类含量、增加产香微生物数量以及促进窖泥成熟和养护等方面,这些都对提升白酒的品质和风味具有积极意义。根据菌种源选用划分为3类培养工艺:一是以窖泥为菌种源进行逐级扩大培养;二是从老窖泥中筛选的优良菌种扩大培养,并由单一己酸菌发展为多菌共培;三是以老窖泥、纯菌种分别培养再混合培养[68]。

3.2.5 其他

无机盐在人工窖泥的培养过程中扮演着至关重要的角色。它是构成菌体的成分,作为酶的组成部分,具有调节

渗透压、酸碱度等功能。包括硫酸盐等含有氮、磷、钾等有关的化合物[69]。在众多企业中,窖泥配方也存在不同之处。张梦梦等[70]研究的四种趵突泉窖泥配方都具有骨粉、猪血和蚕蛹等。还有一些企业,受限于当地地理环境条件,需要添加软化水和保水剂。

3.3 无窖泥生产浓香型白酒

己酸乙酯是浓香型白酒的主体香味成分,在酿造过程中有以下两种途径生成己酸乙酯。

①己酸和乙醇通过COA-SH(辅酶A)反应生成己酸乙酯

$CH_3(CH_2)_4COOH+ATP+COA\text{-}SH\rightarrow(CH_3)_4CO\cdot SCOA+AMP+Ppi$

$CH_3(CH_2)_4CO\cdot SCOA+CH_3CH_2OH\rightarrow CH_3(CH_2)_4COOC_2H_5+COA\text{-}SH$

②产生酯的细菌使用乙酸乙酯生产己酸乙酯

$CH_3COOC_2H_5+CH_3CH_2OH\rightarrow CH_3(CH_2)_2COOC_2H_5+H_2O$

$CH_3(CH_2)_2COOC_2H_5+CH_3CH_2OH\rightarrow CH_3(CH_2)_4COOC_2H_5+H_2O$

在实际生产中,上述两种途径都是通过窖泥当中的微生物代谢来实现的。为了缩短酿酒周期,提高生产效率,去除原酒中窖泥带来的泥臭味,研究人员提出了一种无窖泥生产浓香型白酒的新技术。

无窖泥生产浓香型白酒的方法通常采用现代生物技术,通过人工模拟窖泥中的微生物环境,在酿酒过程中实现微生物的繁殖和代谢,从而生产出具有浓郁香味的浓香型白酒。任雪等[71]采用窖泥微生(己酸菌群)单独培养制备己酸发酵液,再与大曲微生物发酵酒醅(前发酵)混合发酵,实现无窖泥发酵生产浓香型白酒。汪江波等[72]以海藻酸钠为壁材,采用锐孔法进行制备的己酸菌微胶囊,与粮食共同入陶坛发酵,进行无窖泥发酵浓香型白酒。

4 窖泥养护

4.1 窖泥的老化/钙化/退化

在实际生产过程中,窖泥使用一段时间之后,其内的营养物质逐渐被消耗殆尽,有害物质积累过多,导致窖泥微生物菌群的紊乱,进而引起窖泥的老化。窖泥中水分降低、pH值变化等因素导致表面盐碱化、板结变硬,内部出现白色颗粒以及白色针状结晶,称为窖泥钙化。无论是窖泥老化还是钙化,都是窖泥功能的退化现象,是多种因素共同作用的结果,长期使用、不恰当的养护方式、温度和湿度的变化等因素都会导致窖泥退化。无论窖泥的老化、钙化,生产出来的酒体中己酸乙酯含量都在不断降低,口感变差,对浓香型白酒的品质造成影响。正常的窖泥呈乌黑色、湿润,手感柔软细滑,有浓郁的窖泥香,老化的窖泥偏干,手感僵硬,香味较淡,并且理化指标会有显著变化。廖作敏等[73]研究发现,老化后的窖泥氧化还原电位、动电电位、总酸含量、甲酸含量、乳酸含量较高,丁酸含量较低;王艳丽等[74]研究发现,老化窖泥中的钙和铁含量显著升高,而其他理化指标均变低。理化指标的改变会直接影响窖泥内部生态环境,导致稳定的微生物发酵体系发生变化。正常以及老熟窖泥微生物群落多样性指数与窖泥质量呈正相关,老化窖泥的优势菌门数变少,仅有变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门3个优势菌门,其中以变形菌门为主,其微生物群落核心的属集中在拟杆菌纲和梭菌纲[75]。江鹏等[76]认为窖泥老化的原因是窖泥中微生物群落的结构发生了变化,窖泥微生物菌群代谢紊乱,从而使得窖泥发生老化。

4.2 窖泥改善措施

4.2.1 营养物质补充剂

在实际生产中,长时间的生产发酵使窖泥中的营养物质被微生物消耗殆尽,代谢产物逐渐积累,打破了稳定的微生物发酵体系,导致酒体质量下降。此时,需要通过添加外源营养物质来维持平衡。其中窖泥养护液是改善窖泥营养物质不足的常用的措施之一,其是以优质母糟、黄水、中高温大曲、醋酸钠等按比例混合制作而成,或在此基础上再添加己酸菌培养液、优质老窖泥、甲烷杆菌等制作而成[77]。其富含丰富的有机氮源、微量元素、生长因子,能有效提高窖泥主体微生物的数量及质量,改善窖池环境,进而提高浓香白酒优级品率。魏云[61]研究发现,向老化窖泥中添加豆粕发酵液、高腐殖质窖泥等营养物质,可以有效提升窖泥的质量。

4.2.2 功能微生物

窖泥长期使用后老化,己酸产菌等功能菌数量大大减少,严重影响白酒的品质和优质酒的产量。研究发现添加己酸菌等窖泥主要功能菌,可以有效改善老化窖泥。杨将等[78]研究发现,通过从优质老窖泥中分离出高产己酸菌,并与老窖池中过滤的混合菌过滤液1:1混合制备窖泥养护液,对窖泥的改善有着明显作用;郭莹[79]研究发现,以采用兼性厌氧法分离出的产己酸和丁酸菌株复配制成窖泥养护液,不仅使窖泥的感官和理化指标均得到提升,还可提高酯化能力、增强浓香型白酒风味;杜相林[80]研究发现,以5%己酸菌菌液,12%甲烷杆菌菌液,25%老窖泥菌液混合制备的窖泥养护液,使得使窖泥的微生物、理化指标差异性显著,改善窖泥质量。

4.2.3 其他措施

在生产过程中,微生物代谢产物逐渐积累,其中包含大量的有机酸类物质,导致窖泥表面易生成乳酸钙或乳酸镁等难溶物,影响着营养物质进入窖泥。研究发现,产酸菌抑制剂可以缓解窖泥钙化的问题,也可通过“以糟养窖、以窖养糟”生产工艺、“以防为主,防重于治”的养窖原则来提升窖泥质量[81]。

5 窖泥质量评价

栖息在窖泥中的微生物不断适应窖池环境,并从窖泥

和黄水中摄取营养物质进行生长繁殖和复杂的代谢活动，从而使得窖泥在视觉、嗅觉以及触觉等方面发生不同程度的变化，最终导致窖泥品质之间的差异。在实际生产中可以将窖泥分为新窖泥、老熟窖泥、老化窖泥，其中成熟窖泥对于白酒品质影响至关重要，如何评价窖泥质量的好坏非常关键。目前窖泥生产工艺如图2所示，经过四个阶段培养、三次翻抄制成。

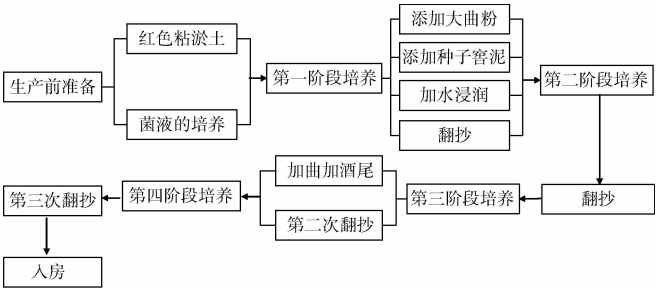

图2 窖泥生产工艺

Fig. 2 Production process of pit mud

窖泥是一个非常复杂的生态系统，且评价指标相对复杂，目前并没有关于窖泥质量的国家标准或者行业标准颁布实施，目前能查到的关于窖泥标准有2018年安徽省食品行业协会发布的团体标准T/AHFIA 007—2018《浓香型白酒窖泥质量技术规范》，该标准明确阐述了浓香型白酒窖泥的生产工艺以及窖泥培养的各阶段流程，同时对其感官和理化指标要求有明确规定；2022年6月29日发布地方标准DB34/T 4235—2022《浓香窖泥检测操作流程》，主要规定窖泥的术语和定义、取样要求、感官检验、理化指标分析和其他指标分析，感官以及理化指标要求如表6所示。

表6 窖泥感官以及理化指标要求

Table 6 Requirements for sensory and physicochemical indicators of pit mud

项目	指标
外观形态	稀稠均匀，水分适当，外观呈灰褐色
香味	香气纯正，有酯香和近似于老窖泥气味，无生泥气味或霉味、杂味
手感	触手柔软，无刺手感，不能出现断面死板和杂质，无干曲或呈疙瘩的泥块
水份/%	34～38
pH值	5.0～6.5
氨态氮/(mg·100 g^{-1}干基)	≥10.0
有效磷/(mg·100 g^{-1}干基)	≥10.0
有效钾/(mg·100 g^{-1}干基)	≥20.0
腐殖质/%干基	≥1.0

研究人员以各酒厂通过从感官指标、理化指标和微生物菌群结构三者相关性与差异性进行评价，建立了窖泥质量评分标准，并确定每个指标的评分细则和分值权重。

研究表明，其中pH、水分、NH_4^+、有效磷、己酸含量水平与窖泥质量呈正相关，而腐殖质、钙、铁、镁、乙醇、乳酸、乙酸含量则与窖泥质量呈负相关，不仅如此，窖泥中的蛋白酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶的活性也随窖泥品质的提升而升高[82]；微生物指标通过测定窖泥中重要功能微生物类群的丰度来判定窖泥质量等级，其中高丰度的己酸菌的活性是表征窖泥成熟、可以生产优质浓香型白酒的重要微生物指标[83]。

6 展望

生产浓香型白酒的功能性微生物在生长和繁殖过程中主要依赖于窖泥作为生态载体。目前，通过现代生物分析技术大量地研究解析了窖泥微生物的菌群结构和群落演替，为研究窖泥功能微生物的组成和人工窖泥的培养提供了科学依据。但关于窖泥品质的研究仍存在很多问题，针对浓香型白酒窖泥的未来发展，本文思考建议如下：

浓香型白酒品质与窖泥息息相关，目前很多浓香型白酒生产企业已经出现酒体中乙酸乙酯含量上升甚至超过己酸乙酯含量的“乙己倒挂”现象，且目前尚未有合适的解决措施，窖泥作为浓香型白酒的重要生产要素，同时也是浓香型白酒特征酿酒功能微生物生长繁殖的主要载体，其对改善浓香细白酒“乙己倒挂”现象具有重要研究意义。

目前对窖泥质量评价的方法主要从感官评价、理化分析检测、微生物及其酶类的研究等方面，但存在主观性强、误差大和较普适性不强等缺点，需要进一步对窖泥质量相关标准进行筛选和总结，建立和完善相应评价体系，使窖泥评价体系更加准确客观。而且目前窖泥没有相关国家或行业参考标准，需要尽快出台相关标准，促进窖泥发展和研究规范化、科学化。

窖泥是一个复杂的微生物生态系统，其在酿酒中的主要功能行业内基本已经研究清楚，但是在白酒发酵过程中的代谢以及协同机理尚未全部明确，可谓是“知其然而不知其所以然”。通过进一步深入研究窖泥内微生物菌群间的互作、协同、物质交换等代谢机理，从而让微生物产生更多的符合消费者喜好的风味化合物。

窖泥内的产己酸菌大多是严格意义上的厌氧菌，筛选困难，培养成本较高。可通过优化培养条件，筛选和培育新己酸菌株，分析微生物代谢底物之间的关系和相互作用的代谢生长机制，以此制作窖泥养护液养护窖泥的作用。

综上所述，窖泥品质研究是白酒产业发展的重要课题，具有广阔的研究前景和实际应用价值。未来，将继续深化对窖泥品质影响因素的认识，探索新的优化策略和技术手段，以期为推动白酒产业的创新发展做出更大的贡献。

参考文献：

[1] LI J, DING Z, DONG W, et al. Analysis of differences in microorganisms and aroma profiles between normal and off-flavor pit mud in Chinese strong-

flavor *Baijiu*[J]. **J Biosci Bioeng**, 2024, 137(5): 360-371.

[2] FANG C, DU H, JIA W, et al. Compositional differences and similarities between typical Chinese *Baijiu* and western liquor as revealed by mass spectrometry-based metabolomics[J]. **Metabolites**, 2019, 9(1): 2.

[3] 刘治国,方超,张晓元,等. 浓香型白酒窖泥理化因子、微生物群落、感官质量以及相关性研究进展[J]. 食品科学,2023,44(21):351-358.

[4] QIAN W, LU Z M, CHAI L J, et al. Cooperation within the microbial consortia of fermented grains and pit mud drives organic acid synthesis in strong-flavor *Baijiu* production[J]. **Food Res Int**, 2021, 147: 110449.

[5] LIANG H, LI W, LUO Q, et al. Analysis of the bacterial community in aged and aging pit mud of Chinese Luzhou-flavour liquor by combined PCR-DGGE and quantitative PCR assay[J]. **J Sci Food Agr**, 2015, 95(13): 2729-2735.

[6] 毛凤娇,黄均,周荣清,等. 人工窖泥微生物群落对浓香型白酒发酵过程风味代谢物形成的影响[J]. 食品科学,2024,45(4):125-134.

[7] 刘昱午. 商代青铜饮酒器——觚、觶赏析[J]. 寻根,2016(1):58-61.

[8] ZHAO Q, YANG S, BAO G, et al. *Lentilactobacillus laojiaonis* sp. nov., isolated from the mud in a fermentation cellar for the production of Chinese liquor[J]. **Int J Syst Evol Microbiol**, 2022, 72(5): 005349.

[9] WEI Y, ZOU W, SHEN C, et al. Basic flavor types and component characteristics of Chinese traditional liquors: A review[J]. **J Food Sci**, 2020, 85(12): 4096-4107.

[10] ZOU W, YE G, ZHANG K. Diversity, function, and application of *Clostridium* in Chinese strong flavor *Baijiu* ecosystem: A review[J]. **J Food Sci**, 2018, 83(5): 1193-1199.

[11] TAN Y W, ZHONG H P, ZHAO D, et al. Succession rate of microbial community causes flavor difference in strong-aroma *Baijiu* making process[J]. **Int J Food Microbiol**, 2019, 311: 108350.

[12] CHEN H, WU Y, WANG J, et al. Uncover the flavor code of roasted sesame for sesame flavor *Baijiu*: Advance on the revelation of aroma compounds in sesame flavor *Baijiu* by means of modern separation technology and molecular sensory evaluation[J]. **Foods**, 2022, 11(7): 998.

[13] 简晓平,施永祥,杨智华,等. 多菌种优质窖泥在浓香型白酒生产中的运用与研究[J]. 酿酒,2022,49(1):52-54.

[14] 胡景辉,胡建祥,陈禹锜,等. 凤香型白酒发展概述[J]. 酿酒,2023,50(5):11-18.

[15] 高传强. 芝麻香型白酒的典型工艺特征[J]. 酿酒,2022,49(2):3-15.

[16] 熊小毛. 浓酱兼香型白云边酒生产工艺技术总结[J]. 酿酒科技,2007(9):35-42.

[17] 李寻,王海玲. 浓酱兼香型白酒[J]. 休闲读品,2022(1):137-156,136,2.

[18] 梁欢,许长峰,朱立宁,等. 浓香型白酒地域性及窖泥微生物研究进展[J]. 中国酿造,2020,39(11):5-8.

[19] 李维青. 浓香型白酒流派[J]. 酿酒科技,2009(12):112-116.

[20] 程伟,李娜,张杰,等. 江淮地区自然环境对柔和型白酒品质的影响[J]. 酿酒科技,2019(6):59-64.

[21] 黄治国,王艳丽,卫春会,等. 不同地域窖泥细菌群落结构差异及其与理化因子相关分析[J]. 酿酒科技,2015(11):18-21,25.

[22] 刘大江,康伯美,白冰如,等. 窖泥中氨基酸含量及其对曲酒质量的影响(第一报)——窖泥成分对酒质的影响研究[J]. 酿酒科技,1987(4):2-5.

[23] 吴衍庸,齐义鹏,徐成基,等. 泸州大曲酒窖泥中微生物的生态分布和嫌气发酵特征[J]. 微生物学通报,1980(3):108-112.

[24] 魏娜,朱晓宇,陶勇,等. 浓香型白酒窖泥中优势菌群的定量PCR分析[J]. 应用与环境生物学报,2015,21(4):635-639.

[25] XU S S, ZHANG M Z, XU B Y, et al. Microbial communities and flavor formation in the fermentation of Chinese strong-flavor *Baijiu* produced from old and new Zaopei[J]. **Food Res Int**, 2022, 156: 111162.

[26] 杜相林,吴任之,桑其明,等. 功能菌在浓香型白酒生产中的应用现状[J]. 酿酒,2022,49(4):17-21.

[27] 成冬冬,董灿灿,韩小龙,等. 浓香型大曲白酒窖池微生物及养护研究进展[J]. 食品科技,2022,47(12):15-19.

[28] 郑慧珍,王慧琳,高江婧,等. 窖泥优势拟杆菌纲微生物*Petrimonas sulfuriphila*的分离及其功能解析[J]. 微生物学报,2022,62(9)3373-3386.

[29] WU L, FAN J, CHEN J, et al. Chemotaxis of *Clostridium* strains isolated from pit mud and its application in *Baijiu* fermentation[J]. **Foods**, 2022, 11(22): 3639.

[30] LIU H, SUN B. Effect of fermentation processing on the flavor of *Baijiu* [J]. **J Agr Food Chem**, 2018, 66(22): 5425-5432.

[31] 胡晓龙,余苗,王康丽,等. 浓香型白酒窖泥微生物群落多样性及理化因素对其影响[J]. 食品研究与开发,2021,42(2):178-185,204.

[32] 张会敏,王艳丽,孟雅静,等. 浓香型白酒新、老窖池池壁泥与池底泥原核菌群结构分析[J]. 食品科学,2020,41(18):180-187.

[33] 刘瑞娜,奚文韬,赵东,等. 浓香型白酒窖池中可培养细菌多样性研究[J]. 食品与发酵工业,2023,49(17):82-93.

[34] ZHANG L, ZHOU R, NIU M, et al. Difference of microbial community stressed in artificial pit muds for Luzhou-flavour liquor brewing revealed by multiphase culture-independent technology[J]. **J Appl Microbiol**, 2015, 119(5): 1345-1356.

[35] 李兵,张超,王玉霞,等. 白酒大曲功能微生物与酶系研究进展[J]. 中国酿造,2019,38(6):7-12.

[36] ZHANG W X, WU Z Y, ZHANG Q S, et al. Combination of newly developed high quality Fuqu with traditional Daqu for Luzhou-flavor liquor brewing[J]. **World J Microb Biot**, 2009, 25(10): 1721-1726.

[37] ZHANG H M, MENG Y J, WANG Y L, et al. Prokaryotic communities in multidimensional bottom-pit-mud from old and young pits used for the production of Chinese strong-flavor *Baijiu*[J]. **Food Chem**, 2020, 312: 126084.

[38] 王春艳,付博辰,郭书贤,等. 宋河浓香型白酒不同窖龄窖壁泥与窖底泥真菌菌群结构分析[J]. 中国酿造,2021,40(2):88-91.

[39] 张荣. 地衣芽孢杆菌固态发酵产地衣素及风味活性物质对白酒品质的影响[D]. 无锡:江南大学,2014.

[40] ZHANG M, WU X, MU D, et al. Profiling the effects of physicochemical indexes on the microbial diversity and its aroma substances in pit mud [J]. **Lett Appl Microbiol**, 2020, 71(6): 667-678.

[41] 张方,张宿义,苏占元,等. 有机酸对浓香型白酒品质及其酿造过程影响的研究进展[J]. 酿酒科技,2016(1):94-102.

[42] BARKER H A. The production of caproic and butyric acids by the methane fermentation of ethyl alcohol[J]. **Arch Microbiol**, 1937, 8(1): 415-421.

[43] 李超,王金晓,冯鹏鹏,等. 己酸菌选育及在浓香型白酒生产中的应用[J]. 中国酿造,2020,39(8):1-6.

[44] JI X, XU Y, MU X Q. Mixed culture of *Clostridium klebsiella* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. **J Food Biotechnol**, 2017, 36(9): 922-926.

[45] WEIMER P J, NERDAHL M, BRANDL D J. Production of medium chain volatile fatty acids by mixed ruminal microorganisms is enhanced

by ethanol in co-culture with *Clostridium kluyveri*[J]. **Bioresour Technol**, 2015, 175: 97-101.

[46] YAN S, DONG D. Improvement of caproic acid production in a *Clostridium kluyveri* H068 and methanogen 166 co-culture fermentation system [J]. **AMB Express**, 2018, 8(1):175.

[47] 赵佳伟,李茂,张伟建,等. 白酒酿造过程中霉菌对酒体品质的影响研究进展[J]. 酿酒科技,2023(3):120-124.

[48] 张惠芳,张婉莹,周索,等. 赊店老酒窖池中产己酸菌分离鉴定及产酸条件研究[J]. 现代食品科技,2023,39(2):188-196.

[49] ZHU X, ZHOU Y, WANG Y, et al. Production of high-concentration n-caproic acid from lactate through fermentation using a newly isolated *Ruminococcaceae bacterium* CPB6[J]. **Biotechnol Biofuels**, 2017, 10: 102.

[50] LIU C, DU Y, ZHENG J, et al. Production of caproic acid by *Rummeliibacillus suwonensis* 3B-1 isolated from the pit mud of strong-flavor *Baijiu*[J]. **J Biotechnol**, 2022, 358: 33-40.

[51] 赵晨婕,刘念,王超凯,等. 窖泥高产己酸菌的分离筛选及发酵性能测试[J]. 中国酿造,2020,39(1):114-118.

[52] 叶凯,李小强,温承坤,等. 窖泥中产己酸细菌的研究进展[J]. 酿酒,2020,47(1):16-20.

[53] 彭兵,祝熙,李忠奎,等. 窖泥高产己酸菌分离鉴定及培养条件优化的研究[J]. 中国酿造,2016,35(5):43-46.

[54] 任海伟,蔡早宁,王希,等. 基于文献计量学的白酒窖泥研究进展与发展态势分析[J]. 食品科学,2023,44(7):267-275.

[55] 谭光迅. 基于活菌数据的浓香型白酒酿造微生物组成、来源和变化规律研究[D]. 武汉:华中农业大学,2020.

[56] 肖琴,何平,周瑞平,等. 不同窖龄及位置浓香型白酒窖泥微生物群落多样性与理化因子的比较分析[J]. 食品科学,2023,44(20):165-174.

[57] TAO Y, LI J, RUI J, et al. Prokaryotic communities in pit mud from different-aged cellars used for the production of Chinese strong-flavored liquor[J]. **Appl Environ Microbiol**, 2014, 80(7): 2254-2260.

[58] 侯冬岩,李铁纯,回瑞华,等. 不同窖龄窖泥中矿物元素的分析研究[J]. 鞍山师范学院学报,2021,23(4):32-35.

[59] MU Y, HUANG J, ZHOU R, et al. Effects of Daqu attributes on distribution and assembly patterns of microbial communities and their metabolic function of artificial pit mud[J]. **Foods**, 2022, 11(18): 2922.

[60] 鲁少文,魏翠翠,李泽华,等. 新型己酸菌强化对人工窖泥培养过程中原核微生物群落结构及酸、酯含量的影响[J]. 应用与环境生物学报,2020,26(1):144-151.

[61] 魏云. 优质人工窖泥的培养及其在应用中质量变化趋势[J]. 酿酒,2021,48(4):68-70.

[62] 黄裕隆,李彦中,李觅,等. 不同地区浓香型白酒窖池筑窖用土特性研究[J]. 酿酒科技,2023(8):70-74.

[63] 牟薏,卫春会,曾波,等. 基于黄水线上下层酒醅及基酒的风味特征分析[J]. 食品与发酵工业,2024,50(19):321-330.

[64] 白鹏凯,许萍,付景鑫. 白酒酿造副产物黄水资源化利用技术方案研究[J]. 工业排水,2019(3):71-77.

[65] 陶勇,芮俊鹏,李家宝,等. 浓香型白酒窖泥中细菌和古菌的组成与多样性[J]. 化工学报,2014,65(5):1800-1807.

[66] 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.

[67] 郭燕. 浓香型大曲在黄水厌氧中产酸特性及微生物演替规律研究[D]. 自贡:四川轻化工大学,2021.

[68] 王邦坤,刘民万,史庆立,等. 人工窖泥培养技术对浓香型白酒品质影响的研究[J]. 酿酒科技,2021(10):61-64.

[69] 陈禹锜. 酒海贮存对风香型白酒品质影响的分析研究[D]. 南宁:广西大学,2023.

[70] 张梦梦,吕志远,苏宁,等. 趵突泉浓香型白酒有机窖泥的培养研究[J]. 酿酒科技,2021(11):85-89.

[71] 任雪,魏晓庆,韩雨辰,等. 无窖泥发酵生产浓香型白酒[J]. 食品与发酵工业,2020,46(7):105-109.

[72] 汪江波,朱嘉璐,金维君,等. 基于己酸菌微胶囊的无窖泥发酵浓香型白酒工艺研究[J]. 食品与发酵工业,2025,51(4):188-197.

[73] 廖作敏,罗雯,代金凤,等. 浓香型白酒窖泥理化电化特性分析[J]. 中国酿造,2018,37(5):92-96.

[74] 王艳丽,孟雅静,何宏魁,等. 不同品质浓香型窖泥理化因子与细菌总量的相关性[J]. 食品与发酵工业,2019,45(3):89-94.

[75] 罗雯,张倩颖,廖作敏,等. 基于高通量测序技术的不同性状窖泥微生物组成研究[J]. 食品与发酵工业,2017,43(9):9-14.

[76] 江鹏,何朝玖,彭春芳,等. 浓香型白酒窖泥养护探讨[J]. 中国酿造,2021,40(2):12-15.

[77] 陈曦,骆筑. 养窖的原理及方法[J]. 酿酒科技,2011(8):63-64.

[78] 杨将,徐敬征,张顺和,等. 窖池高产己酸菌营养液的制备及培养条件优化[J]. 酿酒科技,2023(7):17-21.

[79] 郭莹. 窖泥主要功能菌分离及窖泥养护液制备研究[D]. 郑州:河南工业大学,2022.

[80] 杜相林. 淡雅浓香型白酒窖泥强化及其酒体风味物质分析[D]. 雅安:四川农业大学,2022.

[81] 文成兵,张文学,杨官荣,等. 提高浓香型大曲酒窖泥质量的研究[J]. 酿酒,2018,45(6):66-69.

[82] 叶光斌,罗惠波,杨晓东,等. 基于免培养法研究泸州地区浓香型白酒窖泥原核微生物群落结构[J]. 食品科学,2013,34(17):176-181.

[83] LUO Q C, LIU C L, WU Z Y, et al. Monitoring of the prokaryotic diversity in pit mud from a Luzhou-flavour liquor distillery and evaluation of two predominant archaea using qPCR assays[J]. **J I Brewing**, 2014, 120 (3): 253-261.