

浓香型白酒微量风味成分研究进展

丁海龙^{1,2},熊燕飞^{1,3},沈小娟^{1*},刘双平²,邓波^{1,3},马卓¹,颜禹¹,彭远松¹,李永娇¹

(1.泸州老窖股份有限公司,四川 泸州 646000;2.江南大学 食品学院,江苏 无锡 214000;
3.国家固态酿造工程技术研究中心,四川 泸州 646000)

摘要:浓香型白酒因其泥窖固态发窖、续糟配料、混蒸混烧等有别于其他香型的独特酿造工艺,使其风味成分极大丰富。微量风味成分物质不仅赋予了浓香型白酒重要的特征风味与品质,同时也让白酒具有了一定的保健功能,对人体健康具有潜在益处。该文深入综述了浓香型白酒的风味特点、健康风味成分及其生成的影响因素,系统揭示风味物质的生成机制和调控机制,为白酒行业的健康发展提供理论支持。

关键词:浓香型白酒;微量风味成分;酿造工艺;微生物代谢;健康导向

中图分类号:TS261 文章编号:0254-5071(2025)11-0022-05 doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2025.11.004
引文格式:丁海龙,熊燕飞,沈小娟,等.浓香型白酒微量风味成分研究进展[J].中国酿造,2025,44(11):22-26.

Research progress on trace flavor components of strong-flavor *Baijiu*

DING Hailong^{1,2}, XIONG Yanfei^{1,3}, SHEN Xiaojuan^{1*}, LIU Shuangping², DENG Bo^{1,3}, MA Zhuo¹,
YAN Yu¹, PENG Yuansong¹, LI Yongjiao¹

(1.Luzhou Laojiao Co., Ltd., Luzhou 646000, China; 2.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China;
3.National Engineering Research Center of Solid-state Brewing, Luzhou 646000, China)

Abstract:Strong-flavor (Nongxiangxing) *Baijiu* distinguishes itself from other aroma types through its unique brewing techniques, including pit mud solid-state fermentation, continuous residue replenishment, and simultaneous steaming and distillation with grain blending, which contribute significantly to its exceptionally rich profile of flavor compounds. Trace flavor components not only impart the essential characteristic aroma and quality to strong-flavor *Baijiu* but also enable *Baijiu* to have health function, offering potential health benefits. The flavor characteristics, healthy flavor components, and the influencing factors of their generation were comprehensively reviewed, the formation mechanisms and regulatory mechanisms of these flavor compounds were systematically revealed, and provided theoretical support for the healthy development of the *Baijiu* industry.

Key words:strong-flavor *Baijiu*; trace flavor component; brewing process; microbial metabolism; health-oriented

白酒具有悠久的历史 and 深厚的文化内涵,在中国食品工业中占有重要地位。浓香型白酒又称泸型酒,作为中国白酒的重要代表之一,以其独特风格深受消费者喜爱,长期占据市场主导地位。浓香型白酒是以粮谷为主要原料,利用中高温大曲为糖化发酵剂,采用泥窖固态法发酵,经蒸馏、陈酿、勾调而成^[1-2]。泥窖固态发窖、续糟配料、混蒸混烧等有别于其他香型的独特工艺,使浓香型白酒形成复杂的风味成分和丰富的香气层次。目前研究人员在浓香型白酒中已定性出酯类、酸类、醇类、醛酮类微量成分861种^[3],其中141种成分被认为是主要香气化合物,32种被确定为关键香气化合物,包括8种酯类、4种醇类、5种酸类、6种芳香类等。

白酒中的风味成分不仅决定了其感官特性和品质,部分风味物质还具有抗氧化、抗炎、调节肠道微生物群和改善心血管的功能^[4-6]。SUN J Y等^[7-9]研究发现,约有138种白

酒微量成分对人体健康有积极的影响,主要为酯类、有机酸、吡嗪类、萜类、芳香类等,这些风味物质生成与原粮、酿造工艺和微生物代谢等密切相关。深入解析浓香型白酒的风味成分功能及生成影响因素,对于酿造工艺的优化和白酒品质提升具有指导意义。本文系统解析浓香型白酒的风味特点、健康风味组成、生理活性功能及其生成机制,为深化白酒健康价值研究与工艺优化提供理论参考。

1 浓香型白酒微量风味成分研究历程

浓香型白酒微量风味成分研究是与现代科学发展深度融合的一个过程。20世纪50年代,我国开始对白酒风味成分开展研究。原轻工业部先后实施了白酒三大试点工程,“茅台试点”时周恒刚等学者开展了茅台酒“窖底香”酒体纸层析分析,发现己酸乙酯含量比较突出,又通过对泸州老窖酒检测验证,正式提出己酸乙酯是茅台“窖底香”酒和泸州老窖酒的主体香味物质,形成了对浓香型白酒风味的

收稿日期:2025-05-29 修回日期:2025-07-26

基金项目:四川省科技项目(22ZFSHFZ0002)

作者简介:丁海龙(1983-),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为食品工程。

*通讯作者:沈小娟(1983-),女,高级工程师,硕士研究生,研究方向为酿酒科技管理。

初步认识,成为中国白酒风味研究的里程碑事件^[9]。随着分析技术的发展,研究者开始逐步揭示浓香型白酒的复杂成分。20世纪60年代中期,四川省食品发酵工业研究设计院采用气相色谱仪首次对我国浓香型大曲酒主体香味成分进行了定性定量^[10],发现近40种风味成分,从而对浓香型白酒有了科学而明确的认识,为正确地进行产品品评提供了基础。1979年,第三届全国评酒会正式确立浓香型白酒的香型分类,并建立浓香型白酒感官标准;20世纪80年代,气相色谱技术在白酒分析中开始广泛应用^[11],结合液液萃取(liquid-liquid extraction, LLE)技术富集白酒中非挥发性成分,使白酒可检测风味成分极大丰富;2000年后,随着全二维气相色谱-飞行时间质谱(comprehensive two-dimensional gas chromatography and time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOF MS)为代表的高通量技术应用,浓香型白酒解析到的色谱峰突破1 300个^[12-13],研究者逐步揭示浓香型白酒的复杂风味网络,白酒风味研究向功能性成分挖掘、风味形成动力学领域不断拓展。

2 浓香型白酒微量风味成分及功能

浓香型白酒的风味物质除风味贡献外,部分还存在一定生理活性。如XU Y Q等^[14]研究发现,己酸乙酯为代表的酯类,对于情绪压力的舒缓具有重要作用。有机酸则可调节人体酸碱平衡,PAN M M等^[15]研究发现,乳酸通过影响肠道菌群,进而影响色氨酸代谢途径,促进5-羟色胺的生

成,可改善焦虑和抑郁症状。尤其是吡嗪类、芳香族、萜类等化合物,兼具风味与功能双重属性。

2.1 浓香型白酒中吡嗪类化合物

吡嗪类化合物是一类含有两个氮原子的六元杂环化合物,其广泛存在于天然或加工后的食品中,在各类香型白酒中也均有检出^[16]。吡嗪类化合物的嗅觉阈值极低,总体呈现类似于杏仁、焙烤、肉香等怡人香味,是白酒中重要的香气成分之一。以四甲基吡嗪(2,3,5,6-tetramethylpyrazine, TTMP)为例,其能够为酒体贡献甜香、坚果香及花香,还能对其他香味物质起到明显的烘托作用^[17]。浓香型白酒中的吡嗪类化合物种类及含量较多,以烷基吡嗪类为主,包括四甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪等近20种吡嗪类化合物,其总含量约为500~1 500 μg/L^[18]。其中又以2,6-二甲基吡嗪含量较高,约为300~600 μg/L。

吡嗪类化合物是浓香型白酒中一类重要风味化合物和健康因子功能化合物。其中TTMP因具有抗氧化、改善心血管功能等活性,成为白酒健康功能研究的热点。2006年,吴建峰等^[19]首次提出TTMP是白酒中重要的功能性成分之一,并研究了白酒中TTMP的生成途径。徐岩等^[20]进一步阐明了TTMP的微生物代谢合成机制。杨涛等^[21]经动物模型试验研究后认为TTMP具有保肝、护肝等功效。孙宝国等^[22]提出了吡嗪类化合物是白酒中重要健康因子化合物,为“适量饮酒,有益健康”提供了科学依据。

表1 浓香型白酒中吡嗪类化合物检测方法
Table 1 Detection methods and results of pyrazine compounds in strong-flavor Baijiu

前处理方法	检测分析方法	检测结果	检测结论
直接进样法(direct injection, DI) ^[23]	全二维气相色谱-飞行时间质谱联用(GC×GC-TOF MS) ^[23]	在浓香型白酒中定性分析出四甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪等18种吡嗪类化合物	未提出明确结论
酸化萃取法(acid-base extraction, ABE) ^[24]	气相色谱-质谱联用(gas chromatography-massspectrometry, GC-MS)	在浓香型白酒中定量分析出14种吡嗪类化合物:2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2,6-二乙基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、四甲基吡嗪、2-甲基-3,5-二乙基吡嗪、3-异丁基-2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3-异丁基-6-甲基吡嗪	2,6-二甲基吡嗪含量最高为376 μg/L。不同品牌浓香型白酒吡嗪类化合物总含量差异明显
涡旋辅助液-液微萃取(vortex assisted liquid-liquid microextraction, VALLME) ^[25]	气相色谱-质谱联用(GC-MS)	所有酒样中均定量检出四甲基吡嗪,检出限为0.25 μg/L	四甲基吡嗪含量范围为1.5~2 434.3 μg/L,不同酒样含量差异明显
液-液萃取(LLE) ^[26]	气相色谱-质谱联用(GC-MS)	在浓香型白酒中定量分析出6种吡嗪类化合物:2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、2,3-二甲基吡嗪、三甲基吡嗪、四甲基吡嗪	三甲基吡嗪和四甲基吡嗪含量均>100 μg/L,2,6-二甲基吡嗪含量最高为504 μg/L
顶空固相微萃取(headspace solid-phase microextraction, HS-SPME) ^[27]	全二维气相色谱-飞行时间质谱联用(GC×GC-TOF MS)	在浓香型白酒中定性分析15种吡嗪类化合物:四甲基吡嗪、三甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪等	未提出明确结论

2.2 浓香型白酒中芳香族化合物

芳香族化合物以苯环为核心结构,具有香味特点突出、难挥发、香味保留时间长等特点,是浓香型白酒中一类重要的呈香物质和关键香气化合物。浓香型白酒的芳香族化合物种类和含量均较丰富,并多以酚类物质存在^[28],包括阿魏酸、愈创木酚、4-甲基愈创木酚、4-乙基愈创木酚、香兰

素、丁香酚、儿茶酚等,在酒体中呈现典型的烟熏味、丁香、药香等香气特征^[29-30],如4-甲基愈创木酚具有烟味、4-乙基愈创木酚具有丁香味、香兰素具有淡淡的甜香、香草味^[31]。

研究发现,部分芳香族化合物具有抗氧化、抗炎等生理活性作用,得到了学者的高度关注。如阿魏酸是公认的天然抗氧化剂^[30],其药理作用主要有抗血小板聚集,抑制

血小板5-羟色胺释放,常用于治疗心脑血管疾病及白细胞减少症等病症的药品原料;4-甲基愈创木酚、4-乙基愈创木酚是阿魏酸经微生物降解后的产物,均是优良的自由基清除剂,具有抗氧化作用,可用于慢性气管炎治疗^[31-32]。麝香草酚具有杀菌作用,丁香酚具有解热镇痛、抗炎、麻醉等效果。赵东瑞等^[30]的实验结果证实,白酒的抗氧化性与白酒中香兰素、4-甲基愈创木酚、4-乙基愈创木酚的含量呈正相关关系。

表2 浓香型白酒中芳香族化合物检测方法与结果
Table 2 Detection methods and results of aromatic compounds in strong-flavor Baijiu

前处理方法	检测分析方法	检测结果	结果分析
直接进样(DI) ^[29]	气相色谱-三重四级杆串联质谱(gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry, GC-TQMS)	在浓香型白酒中定量检测到较高含量的4-乙基苯酚、愈创木酚、4-甲基愈创木酚和4-乙基愈创木酚	发现浓香型白酒中的对甲酚、间甲酚明显高于其他香型白酒
顶空固相微萃取(HS-SPME) ^[33-34]	直接-气相色谱-嗅闻(direct-gas chromatography-olfaction, D-GC-O)	在浓香型白酒中定量检测出8种芳香化合物:苯甲醛、苯甲酸乙酯、苯乙酸乙酯、乙酸苯乙酯、苯丙酸乙酯、苯乙醇、苯酚、对甲基苯酚	苯乙酸乙酯等3种芳香化合物具有香气贡献(OAV>1),苯丙酸乙酯被鉴定为浓香型白酒中18种关键香气物质之一
	气相色谱-质谱联用(GC-MS)	在浓香型白酒中定量检测到多种芳香化合物:叔丁基对苯二酚、愈创木酚、圣草酚	圣草酚含量为1.78 mg/L
液-液萃取(LLE) ^[30]	气相色谱-质谱联用(GC-MS)	在浓香型白酒中定性检测出12种芳香化合物:苯丙酸乙酯、4-甲基愈创木酚、苯酚、4-乙基愈创木酚、苯乙酸乙酯、苯乙醛、4-甲基苯酚、4-乙基苯酚、2,4-二叔丁基苯酚、香兰素、苯乙醇、苯丙酸	苯丙酸乙酯、4-甲基苯酚、4-乙基愈创木酚、4-甲基愈创木酚、4-乙基苯酚的香气活性值较高(OAV>1)。苯丙酸乙酯对样品风味影响较大,是样品中重要的呈现甜香香气的风味物质
液-液微萃取(liquid-liquid microextraction, LLME) ^[35-36]	气相色谱-质谱联用(GC/MS)	在浓香型白酒中定量检测9种芳香化合物:苯乙酸乙酯、苯甲醛、苯乙醛、苯乙醇、4-甲基苯酚、苯丙酸乙酯、愈创木酚、苯甲醇	苯乙酸乙酯、4-甲基苯酚、苯甲醛、苯丙酸乙酯、愈创木酚等5种化合物OAV均>1,苯乙酸乙酯的含量和香气活力值最高。4-甲基苯酚被认为与窖泥臭有关,是浓香型白酒中呈现窖香风味的特征香气成分
	反相高效液相色谱-荧光检测(reversed-phase high performance liquid chromatography fluorescence detection, RP-HPLC-FLD)	在浓香型白酒中定性检测出10种酚类物质:苯酚、愈创木酚、对甲酚、间甲酚、邻甲酚、4-甲基愈创木酚、4-乙基苯酚、4-乙基愈创木酚、4-乙基苯酚和4-乙基愈创木酚	确证上述10种酚类化合物对酒样的香气影响显著

2.3 浓香型白酒中萜类化合物

萜类化合物是所有异戊二烯聚合物及其衍生物的总称,其通式为(C₅H₈)_n。按其碳原子分类,可分为单萜、倍半萜、二萜、三萜和四萜或胡萝卜素,其广泛存在于自然界,是构成部分植物的树脂、香精及色素等的成分^[37]。部分萜类化合物具有挥发性,在浓香型白酒中也有发现,闻起来有芳香气味,为白酒带来优雅细腻的味道。

萜类化合物不仅具有独特的香气,还是一类具有多种生物活性的天然化合物。目前,白酒中已报告健康因子202种,其中萜类化合物有108种,占据了大部分^[37]。萜类具有镇静镇痛、抗菌抗氧化以及护胃助消化等多种生理功效^[38]。如β-桉叶醇、薄荷醇和芳樟醇具有镇静和镇痛药理作用,α-松油醇、β-石竹烯具有较好的抗菌作用。值得关注的是,不同品牌的浓香型白酒检测的萜类化合物种类差异较大,与其酿造原料、环境微生物的菌群结构尤其是放线菌有较大关系^[39]。窖泥中的放线菌和霉菌可通过萜类合成酶催化生成单萜和倍半萜前体。研究发现,老窖泥中萜烯类化合物的含量是新窖的3~5倍,进一步验证了窖龄对健康成分的累积作用。

表3 浓香型白酒中萜类化合物检测方法与结果
Table 3 Detection methods and results of terpenoids compounds in strong-flavor Baijiu

前处理方法	检测分析方法	检测结果	结果分析
顶空固相微(HS-SPME) ^[37]	气相色谱质谱(GC-MS)	在浓香型白酒中定量检测出9种萜类化合物:反,反-2,4-癸二烯醛、β-石竹烯、α-蒎烯、α-蒎烯醇、长叶蒎烯、香叶基丙酮、反式-橙花叔醇、喇叭茶醇、植酮、异长叶醇	9种萜类化合物总含量为338.56 μg/L
搅拌棒吸附萃取(stir bar sorptive extraction, SBSE) ^[40]	全二维气相色谱-飞行时间质谱联用(GC×GC-TOF MS)	定性检测出91种萜类化合物,其中倍半萜居多达39种:金合欢烯、古芸烯、香橙烯、香柠檬烯、雪松烯、蛇床烯、罗汉柏烯、槐香烯、杜松烯等	以倍半萜为主,具有较强香气和生理活性
液-液萃取(LLE) ^[41-42]	气相色谱-质谱联用(GC-MS)	定性检测出11种萜类化合物:乙反式石竹烯、橙花醇、石竹素、香茅醛、里那醇氧化物、α-萜品醇、α-萜品油烯、橙花醛、里那醇、法尼醇、香草醛	未提出明确结论
	气相色谱-质谱联用(GC-MS)	定性检测出30种萜类化合物:对-异丙甲苯、间-异丙基甲苯、刺柏烯、芳姜黄烯、α-雪松醇、樟脑、乙酸橙花酯、乙酸香叶酯等	在浓香型白酒中首次发现萜烯类化合物

2.4 浓香型白酒中其他风味成分

除了上述几类健康风味成分外,浓香型白酒中还含有一些其他具有潜在健康价值的物质。如来源于原料或微生物胞外分泌的多糖类物质,可调节肠道菌群平衡、增强免疫力;可调节人体代谢和改善人体睡眠情况氨基酸类物质以及内酯类化合物、脂肽类化合物、 γ -氨基丁酸等物质,均存在一定生理活性功能。

3 浓香型白酒微量风味物质生成影响因素

浓香型白酒微量风味成分的生成受酿造原粮、酿造工艺、微生物代谢等条件的综合调控,其形成机制复杂且具有动态性。

3.1 酿造原料

酿造原料是影响浓香型白酒风味物质生成的基础因素。高粱是浓香型白酒的主要酿造原料,其蕴含的淀粉经糖化代谢生成醇、酸,并由酯化酶合成酯类。高粱中的蛋白质与糖类反应形成呋喃、吡嗪和吡咯等风味物质^[43]。优质高粱中含有适量单宁,作为酚类前体参与健康成分的合成,是生成丁香酸、丁香醛、4-乙基愈创木酚等多种芳香族化合物的底物。

3.2 酿造工艺

浓香型白酒的酿造工艺体系以泥窖固态酿造为核心,通过续糟配料、混蒸混烧的生产方式,最终形成浓香型白酒的典型风格。泥窖固态酿造是浓香白酒的独特生产方式,老窖泥中富含梭菌、杆菌、甲烷菌等功能菌群,可促进酯类、醛类等风味物质的合成。研究表明,随着窖龄的增长,微生物菌群结构不断驯化和富集,窖泥中的微生物多样性增加^[44],窖池中健康风味成分含量显著提升。循环母糟中的酸类物质可抑制杂菌,促进风味前体物质的循环积累。蒸馏和陈酿过程对浓香型白酒健康风味物质的形成和发展也起着重要作用。分段摘酒技术可分离不同沸点的风味物质,更好地保留白酒中的香气成分和健康风味物质,从而提升酒体的健康属性。白酒陈酿过程中氧化、酯化、缩合等反应,促进了一些健康风味物质的生成和转化。

3.3 微生物代谢

浓香型白酒的酿造过程是由细菌、霉菌、酵母菌以及放线菌等参与的复杂的微生物发酵过程,香味成分产生的主要途径来源于微生物的代谢反应^[45-46]。浓香型白酒的微生物群落具有时空异质性,每一个酿酒生产轮次,均是窖池微生物区系动态发展和平衡的过程。发酵前期霉菌、酵母菌快速繁殖,淀粉被快速分解。发酵中期酒精和酸度不断提升,细菌多样性大幅下降,乳杆菌丰度增加。发酵后期厌氧与兼性厌氧微生物代谢旺盛,酯类物质开始大量合成。

4 浓香型白酒风味成分生成的代谢调控

随着基因组学、代谢组学、合成生物学等现代生物技术的学展,研究者们通过功能微生物菌株选育以及微生物

代谢调控,不断优化健康风味物质的生成。一方面,可以通过选育优良的微生物菌株,提高其产香能力和代谢效率。如宾志强等^[47]筛选出高产吡嗪类化合物的微生物菌株,将其应用于白酒酿造中,四甲基吡嗪含量高达144.18 mg/L,较对照组提高2.54倍;另一方面,合成生物学在酿造风味成分定向合成方向展现出巨大潜力。ZHU X等^[48]构建了白酒微生物基因与基因组目录并鉴定出多个生物合成基因簇(biosynthetic gene cluster, BGCs),通过研究证实了地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)利用BGCs,具有合成与白酒风味物质密切相关的脂肽类物质地衣素的能力。这一发现为利用合成生物学手段定向设计风味物质开辟了新路径。

5 总结与展望

浓香型白酒具有独特的风味特点,其微量风味成分不仅决定了白酒的品质,还与人体健康密切相关。酯类、酸类、吡嗪类、芳香族、萜类等多种风味成分赋予了浓香型白酒潜在的健康价值,而酿造原粮、酿造工艺和微生物代谢等因素对这些微量风味物质的生成起着关键作用。目前,白酒科研工作者们已然对浓香型白酒微量成分种类及其功能作了深入研究,然而,对于风味物质生成影响因素的认识尚不够全面,对健康风味成分生成的代谢调控机制亦有待进一步解析和阐明。面对行业高质量发展需求与“健康化、品质化”的消费趋势,要求科研工作者们继续深入解析风味物质生成的微生物代谢通路,积极探索功能菌株定向培育、代谢路径人工干预等技术路径,以实现健康风味物质的定向合成与稳定表达,最终推动浓香型白酒从传统酿造向“风味-健康”双向的科学酿造转型。

参考文献:

- [1] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 10781.1—2021 白酒质量要求 第1部分:浓香型白酒[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
- [2] 李静心,刘虎军,程中亮,等. 高粱营养品质对浓香型白酒酿造品质的影响[J]. 中国酿造,2025,44(4):41-48.
- [3] WANG J S, CHEN H, WU Y S, et al. Uncover the flavor code of strong-aroma *Baijiu*: Research progress on the revelation of aroma compounds in strong-aroma *Baijiu* by means of modern separation technology and molecular sensory evaluation[J]. *J Food Compos Anal*, 2022, 109: 104499.
- [4] 丁海龙,敖灵,邓波,等. 中国白酒微量健康成分分析[J]. 中国酿造,2018,37(2):11-14.
- [5] 孙金沅,闫如毓,孙宝国. 白酒中酚类化合物的代谢转化、风味贡献及健康功效研究[J]. 武汉轻工大学学报,2025,44(1):1-8,21.
- [6] 孙宝国,李贺贺,胡萧梅,等. 健康白酒的发展趋势[J]. 中国食品学报,2016,16(8):1-6.
- [7] SUN J Y, ZHU Y M, WANG P Y, et al. Research progress in the flavor chemistry and health effects of *Baijiu*[J]. *Agric Prod Process Stor*, 2025, 1: 2.
- [8] 吴继红,黄明泉,郑福平,等. 健康白酒的研究进展[J]. 食品科学技术学报,2019,37(2):17-23.

- [9] 胡景辉,陈禹锜,薛新新,等. 浓香型白酒发展概述[J]. 中国酿造,2022,41(6):24-30.
- [10] 李大和. 中国白酒“三大试点”研究回顾[J]. 酿酒科技,2017(6):17-25,28.
- [11] 沈怡方. 白酒生产技术全书[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007:762.
- [12] 徐占成,陈勇,王双. 利用SBSE 和全二维气质联用(GC×GC-TOF MS)新技术解析白酒香味物质的研究[J]. 酿酒科技,2012(7):50-55.
- [13] YAO F, YI B, SHEN C, et al. Chemical analysis of the Chinese liquor Luzhoulaojiao by comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry[J]. **Sci Rep**, 2015(5): 1-6.
- [14] XU Y Q, ZHAO J R, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese traditional fermented *Baijiu*: The great contribution of ester compounds[J]. **Food Chem**, 2021(7): 130920.
- [15] PAN M M, QIAN C L, HUO S Y, et al. Gut-derived lactic acid enhances tryptophan to 5-hydroxytryptamine in regulation of anxiety via *Akkermansia muciniphila*[J]. **Gut Microbes**, 2025, 17(1): 2447834.
- [16] 张艳红,范文来,徐岩,等. 顶空固相微萃取与气相色谱-火焰热离子检测器联用测定白酒中吡嗪类化合物[J]. 分析实验室,2008(6):39-41.
- [17] 丁海龙,沈小娟,宋川,等. 中国白酒健康功能成分吡嗪类化合物研究进展[J]. 中国酿造,2022,41(9):8-12.
- [18] FAN W L, XU Y, ZHANG Y. Characterization of pyrazines in some Chinese liquors and their approximate concentrations[J]. **J Agr Food Chem**, 2007, 55(24): 9956-9962.
- [19] 吴建峰. 中国白酒中健康功能性成分四甲基吡嗪的研究综述[J]. 酿酒,2006,33(6):13-16.
- [20] 徐岩,吴群,范文来,等. 中国白酒中四甲基吡嗪的微生物产生途径的发现与证实[J]. 酿酒科技,2011(7):37-40.
- [21] 杨涛,李国友,吴林蔚,等. 中国白酒健康因子的研究及其产生菌选育和在生产中的应用(I)中国白酒健康因子的研究[J]. 酿酒科技,2010(12):65-69.
- [22] 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.
- [23] 王双. 利用全二维气质联用仪对剑南春白酒中吡嗪类生理活性物质的研究[J]. 酿酒,2016,43(5):49-50.
- [24] 余晓,尹建军,胡国栋. 白酒中含氮化合物的分析研究[J]. 酿酒,1992,19(1):71-76.
- [25] 孙啸涛,王宗元,刘森,等. 涡旋辅助液液微萃取结合GC-MS法检测67种白酒中四甲基吡嗪、4-甲基愈创木酚和4-乙基愈创木酚[J]. 食品科学,2017,38(18):73-79.
- [26] 王国明,尹婉婧,乔阳,等. 浓香型“山庄老酒”中吡嗪类物质的分析研究[J]. 中国酿造,2015,34(4):146-149.
- [27] 李安军,徐祥浩,汤有宏,等. 基于全二维气相色谱-飞行时间质谱分析对古井贡酒健康功能成分的研究[J]. 酿酒科技,2016(1):50-52.
- [28] 祝贺,杨涛,郝哲兵,等. 酚类对酒的风味影响及白酒酚类控制策略[J]. 食品工业科技,2019,40(18):361-367.
- [29] YANG K Z, HE Z L, LU J L, et al. Volatile phenols: Direct analysis using large volume injection online trapping-gas chromatography tandem mass spectrometry (LVI-GC-MS/MS) and aroma contribution to different aroma-type of *Baijiu*[J]. **ACS Food Sci Technol**, 2024, 4(5): 1062-1071.
- [30] 赵东瑞. 古井贡酒风味物质及酚类风味物质的抗氧化性和抗炎性的研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- [31] 李贺贺,柳金龙,梁金辉,等. 2种古井贡酒中挥发性成分的研究[J]. 食品科学技术学报,2016,34(1):55-65.
- [32] 闫如毓,郝慧宜,苗子健,等. 浓香型白酒发酵过程中4-甲/乙基愈创木酚的代谢规律分析[J]. 食品与发酵工业,2023,49(11):41-46.
- [33] 施珂,孙啸涛,沈才洪,等. 基于直接-气相色谱-嗅闻的整体感官评价模式分析泸香型白酒的关键香气成分[J]. 食品工业科技,2020,41(7):208-219.
- [34] 杜然,郭律均,闫建斌. 超分辨质谱分析浓香型白酒洋河梦之蓝(手工班)生物活性物质的研究[J]. 酿酒科技,2019(6):30-34.
- [35] 杨康卓,刘芳,何张兰,等. 五粮液原酒中特殊芳香族化合物的空间分布[J]. 酿酒科技,2021(5):22-26.
- [36] PENG Q R, DONG R, XUN S Y, et al. Determination of volatile phenols in Chinese liquors by high-performance liquid chromatography associated with β -cyclodextrin and a protective barrier layer[J]. **Flavour Fragr J**, 2013, 28: 137-143.
- [37] 冯敏雪,甘霖耀,赵晴,等. 浓香型白酒酿造过程中萜类化合物及溯源分析[J]. 食品科学,2023,44(6):254-261.
- [38] 范文来,徐岩. 白酒中重要的功能化合物萜烯综述[J]. 酿酒,2013,40(6):11-16.
- [39] FENG M X, HUO Q J, GAN L Y, et al. Effects of four strains of actinomycetes on the content of terpenoids in *Baijiu*[J]. **Foods**, 2023, 12(7): 1494.
- [40] 徐占成,陈勇,莫凯,等. 剑南春酒中萜烯类生理活性物质的分析研究[J]. 食品与发酵科技,2009,45(5):1-2.
- [41] 徐军. 浓香型枝江白酒香味成分的分析研究[D]. 武汉:华中农业大学,2019.
- [42] 范文来,徐岩,杨廷栋,等. 应用液液萃取与分馏技术定性绵柔型蓝色经典微量挥发性成分[J]. 酿酒,2012,39(1):21-29.
- [43] 金尚萍,惠明,田青. 酱香型白酒风味物质及影响因素的研究进展[J]. 发酵科技通讯,2022,51(3):164-168,181.
- [44] TAO Y, LI J B, RUI J P, et al. Prokaryotic communities in pit mud from different-aged cellars used for the production of Chinese strong-flavored liquor[J]. **Appl Environ Microb**, 2014, 80(7): 2254-2260.
- [45] 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.
- [46] 张宿义,刘森,沈才洪,等. 泸香型白酒窖泥微生物生态功能研究进展[J]. 酿酒科技,2021(1):71-76,84.
- [47] 宾志强,李双钰,张添琦,等. 高产四甲基吡嗪芽孢杆菌的筛选及其在酱香型白酒发酵中的应用[J/OL]. 食品与发酵工业,1-12[2025-11-11]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042973>.
- [48] ZHU X, CHEN L, YANG P, et al. Microbiome catalog and dynamics of the Chinese liquor fermentation process[J]. **Bioresour Technol**, 2025, 431: 132620.