

乳酸菌对发酵蔬菜风味影响研究进展

Research progress on the effect of lactic acid bacteria on the flavor of fermented vegetables

侯小艺^{1,2} 王建辉^{1,2,3} 邓 娜^{1,2,3}

HOU Xiao-yi^{1,2} WANG Jian-hui^{1,2,3} DENG Na^{1,2,3}

李 慧^{1,2,3} 张 博^{1,2,3} 蔡勇建^{1,2,3}

LI Hui^{1,2,3} ZHANG Bo^{1,2,3} CAI Yong-jian^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学预制菜现代产业学院, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省湘味餐调智造与质量安全工程技术研究中心, 湖南 长沙 410023)

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Modern Industrial College of Prepared Dishes, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Intelligent Manufacturing and Quality Safety of Xiang Flavoured Compound Seasoning for Chain Catering, Changsha, Hunan 410023, China)

摘要:蔬菜发酵过程中微生物的种类与数量复杂多变,乳酸菌作为蔬菜发酵过程中的主要“动力”,其参与调控多种代谢途径而影响风味的形成。文章阐述了蔬菜发酵过程中主要风味代谢物的变化及其与乳酸菌群落结构和丰度的内在关联,进而探讨乳酸菌发酵产生风味物质的潜在机制,并对乳酸菌在发酵蔬菜中的应用进行了展望。

关键词:发酵蔬菜;乳酸菌;风味;代谢

Abstract: In the process of vegetable fermentation, the variety and quantity of microorganisms are complex and changeable. Lactic acid bacteria (LAB), as the main power in the process of vegetable fermentation, participate in the regulation of various metabolic pathways and affect the formation of flavor. In this review, the changes of major flavor metabolites during vegetable fermentation and their internal relationship with the community structure and abundance of LAB were summarized, then the potential mechanism of LAB fermentation to produce flavor substances was discussed. Moreover, the application of LAB in vegetable fermentation was prospected.

Keywords: fermented vegetables; lactic acid bacteria; flavor; metabolism

发酵是一种生物保藏蔬菜的方法,有益微生物可利用蔬菜中的营养素产生有机酸、细菌素等抑菌物质,这些物质主要通过增加有害微生物的细胞膜通透性来抑制其繁殖,从而延长蔬菜货架期^[1]。随着社会的快速发展与快节奏化,消费者对经过标准化生产的半成品菜肴(预制菜)的依赖度不断提高,而发酵蔬菜作为一种常见的预制菜,也顺应了当前“速食”的消费风潮^[2]。

蔬菜发酵过程中的微生物来源于各个发酵阶段,其数量多且种类复杂。在发酵环节,它们能分解利用原料中的碳水化合物、蛋白质和矿物质等营养素,不仅能丰富产品风味,同时还可提高其营养价值^[3]。其中,乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB)是蔬菜发酵过程中的优势微生物,影响着产品特征性风味化合物的形成。LAB具有丰富的物种多样性,由 6 个科、40 个属、约 380 种菌组成,在系统发育上属于厚壁菌门乳酸菌目。研究^[4]表明,乳酸杆菌(*Lactobacillus*)、乳球菌(*Lactococcus*)、明串珠菌(*Leuconostoc*)、片球菌(*Pediococcus*)、链球菌(*Streptococcus*)和魏斯氏菌(*Weissella*)是发酵蔬菜中主要的乳酸菌属,与产品的风味形成密切相关。具体而言,LAB通过代谢产生氨基酸、多肽、有机酸及其他物质,它们不仅能抑制腐败菌及致病菌的繁殖,还可丰富发酵蔬

基金项目:湖南省自然科学基金杰出青年科学基金项目(编号:2021JJ10007);湖南省科技重点研发项目(编号:2021NK2015, 2019SK2121);湖南省科技人才托举工程中青年学者培养计划项目(编号:2019TJ-Q01)

作者简介:侯小艺,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

通信作者:王建辉(1980—),男,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: wangjh0909@163.com

收稿日期:2023-01-25 **改回日期:**2023-04-06

菜的风味。文章拟针对发酵蔬菜中 LAB 的种类、丰度及其对风味形成的作用机制进行综述,以期对蔬菜发酵工艺的改善、产品品质的提高和调控提供依据。

1 LAB 与发酵蔬菜中风味物质的相关性

风味是影响发酵蔬菜质量和消费者接受程度的关键指标。发酵蔬菜的呈味物质主要包括:糖类化合物(葡萄糖、果糖等)、氨基酸(甘氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸等)、有机酸(乳酸、乙酸等)、挥发性风味物质(酯类、醇类、芳烃类化合物等)和其他呈味物质(甘露醇)。这些呈味化合物主要来源于原辅料自身特有的风味物质及其发酵后产生的风味物质。

1.1 蔬菜发酵过程中 LAB 的动态变化

发酵蔬菜风味的转化过程依赖于多菌种的协同发酵,由于不同发酵阶段的优势菌群不同,所形成的风味物质也存在差异。LAB 作为蔬菜发酵过程中的优势菌,其种类和丰度主要受发酵时间的影响。① 发酵初期,以异型乳酸发酵为主。好氧微生物消耗发酵容器中的氧气,使得明串珠菌能利用蔬菜表面渗出的汁液生长并产酸,成为发酵初期的优势菌属^[5]。明串珠菌通过代谢产生乳酸、乙酸、乙醇等来降低环境的 pH 值,从而防止有害微生物对果胶酶的水解作用,保持蔬菜的硬度和脆性^[6]。然而,随着蔬菜发酵体系酸度的不断增加,明串珠菌也因耐酸性较弱而受到抑制。② 发酵中期,以同型乳酸发酵为主。此阶段,乳杆菌和植物乳杆菌因其较强的耐酸/耐盐性而逐渐成为优势菌属,其代谢产生乳酸、乙酸等有机酸以及 2-庚酮、2-壬酮等风味物质,可赋予产品清爽的口感^[6-7]。③ 发酵后期,体系内酸性物质积累量增加,氧气含量下降,好氧微生物逐渐消减,而耐酸、耐盐能力强的 LAB 得到较好生长,其丰富度和多样性呈先增后减的趋势。研究^[8]发现,植物乳杆菌是卷心菜和黄瓜发酵后期的主要菌群之一。此外,温度也会影响发酵过程中 LAB 的种类与数量,例如,明串珠菌在 10~15 °C 条件下会大量繁殖,而在温度上升为 20~25 °C 时,魏斯氏菌和乳酸球菌逐渐成为优势菌^[9]。因此,应严格控制发酵时间和温度,以免因发酵时间过长、温度过高而产生影响产品风味的物质^[10]。

1.2 原辅料赋予的风味物质

蔬菜自身特有的风味化合物会影响发酵产品特征性风味成分的形成。新鲜白菜中含有硫化丙烯、异硫氰酸烯丙酯和异硫氰酸丁酯等具有辛辣风味的化合物,其含量随发酵时间延长而逐渐降低^[11]。同理,辣椒(2-乙基丙烷、油酸甲酯和十四醛)及萝卜的特征性风味物质[4-(甲硫基)-3-丁烯基异硫氰酸酯]赋予原料的辛辣感也会随发酵的进行而逐渐降低^[12-13]。新鲜黄瓜富含醇类和羰基化合物,其中,反-2,顺-6-壬二烯醇、反-2,顺-6-壬二烯醛

等物质是黄瓜中清新味的主要来源^[13]。除蔬菜原料自身带有的风味物质外,添加的辅料、香辛料也影响成品风味的构成。比如,洋葱和大蒜中含有大量二烯丙基三硫化物、二烯丙基硫代亚磺酸酯等硫化物,生姜的风味物质以萜烯类为主,这些辅料的添加不仅增加发酵蔬菜香味,还使产品兼具抗氧化、抗炎、抑菌和促消化等功效^[14-15]。

1.3 LAB 对发酵蔬菜风味物质的影响

1.3.1 发酵对蔬菜中游离糖的影响 发酵蔬菜的风味一部分来源于原辅料的呈味物质,而另一部分则是源于 LAB 的发酵作用。在发酵过程中,LAB 利用蔬菜中的糖类化合物分泌乳酸菌素,产生乙醇、乳酸等物质^[16-17]。其中,嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌及干酪乳杆菌等菌株能将蔗糖分解为小分子的果糖和葡萄糖。随着发酵的进行,厌氧 LAB 数量逐渐增加,它们将蔬菜中的糖进一步转化为酸类和醇类物质,因此,发酵体系葡萄糖含量一般呈现先增加后减少的趋势^[9]。在 LAB 作用下,蔬菜中的碳水化合物经降解后,不但可以丰富发酵蔬菜的风味,还能与某些风味前体物质(如游离脂肪酸、氨基酸等)相互作用,生成酸、酯、醇、醛、酮和含硫化合物等风味成分^[18]。

1.3.2 发酵对蔬菜中有机酸的影响 在蔬菜发酵阶段,LAB 可代谢产生多种有机酸如乳酸、乙酸、甲酸和乙醇等,使食品基质快速酸化,进而形成发酵蔬菜独特的酸味^[19]。由表 1 可知,不同蔬菜原料发酵前后有机酸的含量和种类各异,从而展现出不同的风味。例如,新鲜白菜发酵后最主要的有机酸是乳酸、乙酸和柠檬酸等,泡萝卜则以草酸为主,而泡椒中乙酸含量丰富^[12-13,24]。蔬菜发酵过程中,有机酸含量过高或过低均不利于产品风味的形成,而 LAB 可平衡其浓度,赋予产品宜人的酸味。例如,过高浓度的苹果酸会产生令人刺鼻的气味,但 LAB 可通过苹果酸—乳酸发酵途径,以苹果酸为底物代谢产生低酸度阈值的乳酸,达到调控有机酸浓度的作用。具有柔和酸味的乳酸能掩盖蔬菜本身的青臭味,进而提升发酵产品的口感^[25]。乳酸的积累主要取决于 LAB 的糖代谢过程,异型乳酸发酵主要产生乳酸、乙醇和 CO₂ 等;而在同型发酵过程中,还原糖通过糖酵解途径(EMP)产生丙酮酸,其随后被还原为乳酸^[26]。此外,随着发酵过程的进行,LAB 还能进一步将有机酸代谢为酯、酮、醇和醛等其他风味化合物^[13]。

1.3.3 发酵对蔬菜中氨基酸的影响 蛋白质经水解产生的肽和氨基酸也能改善产品风味。虽然 LAB 对蛋白质的水解能力较弱,但水解产物对部分发酵蔬菜的风味形成仍具有重要作用。作为挥发性化合物的前体,游离氨基酸可与多种物质相互作用,从而改变最终产品的风味特征^[13]。其中,芳香族氨基酸(AAA)是酚类、醚类和某些含芳环类风味物质的前体。Xiao 等^[22]对江西腌菜、四川泡菜和东北酸菜的风味成分变化进行研究,发现发

表 1 蔬菜发酵类食品中与风味形成相关的优势乳酸菌

Table 1 Dominant lactic acid bacteria related to flavor formation in vegetable fermented foods

研究对象	主原料	发酵时间/d	发酵方式	蔬菜原有的主要风味物质	主要乳酸菌属微生物	发酵后产品的主要风味化合物	参考文献
韩国泡菜	白菜	3~5	自然发酵	异硫氰酸烯丙酯、异硫氰酸丁酯、异硫氰酸环丙酯；棕榈酸乙酯、亚麻酸乙酯；	明串珠菌、乳杆菌、魏斯氏菌	醋酸、乳酸、乙醇、谷氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸、甘露醇、氨基酸、甲酸、苹果酸、双乙酰、乙偶姻、2, 3-丁二醇等	[20]
东北酸菜		30	自然发酵 接种发酵	α -姜黄烯、 α -雪松烯、 β -倍半水芹烯； β -紫罗兰酮；棕榈酸等	植物乳杆菌、副干酪乳杆菌、明串珠菌、魏斯氏菌	乳酸、乙酸、丙氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸、谷氨酸、2-甲基丙酸、己醇、芳樟醇、异戊醇、苯乙醇、异丁醇、3-苯丙醇、乙酸异戊酯、乙辛酸酯、乳酸乙酯、乙酸乙酯、 γ -癸内酯、壬醛、癸醛、辛醛、柠檬醛等	[11,21]
四川泡菜		7	自然发酵		乳酸杆菌、明串珠菌	乙酸、乳酸、芳樟醇、亮氨酸、脯氨酸、3-羟基-2-丁酮、二甲基二硫醚、二戊基硫醚、3-苯丙醇、辛醇、苯乙醇等	[11]
东北酸菜	卷心菜	20	自然发酵	异硫氰酸酯类、二甲基二硫丙基腈烯、1-羟基-3-己烯	乳酸杆菌、明串珠菌、片球菌、魏斯氏菌	草酸、乳酸、丙氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸、苯丙氨酸、(E)-2-己烯醇、1-己醇、顺庚-4-烯醇、1-辛醇、芳樟醇、苯乙醇、3-苯丙醇和 2, 5-二甲基苯甲醛等	[20,22]
四川泡菜		20	自然发酵		乳酸球菌、明串珠菌、乳酸杆菌、魏斯氏菌、果糖杆菌、片球菌	乳酸、甲酸、丙氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸、谷氨酸、异亮氨酸、3-巯基己基丁酸酯、1, 2-丙二醇二甲酸酯、2-丁烯酸、薰衣草乙酸酯、3-(甲基硫)异硫氰酸丙酯、哌啶-2-硫酮等	[22-23]
泡椒	辣椒	60	自然发酵 接种发酵	油酸甲酯、十三酸甲酯、11, 14-二烯二十酸甲酯、2-乙基丙烷、十四醛、葵花醇等	乳酸杆菌、明串珠菌	乳酸、乙酸、丙氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸丁酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸己酯、乙酸乙酯、己酸乙酯、乙醛、戊醛、3-甲基丁醛、乙烯、柠檬烯、十一烯、丁二酮等	[24]
江西腌菜	盖菜	6~8	自然发酵	—	乳酸杆菌、片球菌	草酸、乙酸、乳酸、丙氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸、3-辛酮、甲酸异戊酯、芥子酸、7-二烯、1, 2, 3, 4-四甲基苯、2, 4-叔丁基苯硫醇、3-甲基庚-1, 6-二烯-3-醇、5-氨基-2, 5, 8-三甲基壬二酸等	[22]
泡萝卜	萝卜	12	自然发酵	4-(甲硫基)-3-丁烯基异硫氰酸酯、异硫氰酸己酯、异硫氰酸戊酯、3-(甲基硫代)苯基异硫氰酸酯；2, 3-二甲基-3-己醇、甲硫醇；二甲基二硫醚、二甲基三硫醚	乳酸杆菌、乳酸球菌	草酸、乳酸、乙酸、苯丙氨酸、丙氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸、哌啶-2-硫酮、二甲基三硫醚、3-(甲硫基)丙基异硫氰酸酯等	[13,15]

酵蔬菜含有丰富的氨基酸，主要包括丙氨酸、缬氨酸、丝氨酸、组胺酸、亮氨酸、谷氨酸、异亮氨酸和苯丙氨酸等。另有研究^[27]表明，泡菜发酵过程中谷氨酸与天冬氨酸含量逐渐上升，而丝氨酸与丙氨酸含量逐渐降低。不同种类 LAB 对氨基酸的利用程度不同，造成泡菜中游离氨基

酸的组成也不同。比如，植物乳杆菌能调控发酵蔬菜中原有的氨基酸比重，使脂肪族氨基酸含量上升，苦味氨基酸含量下降^[28]。此外，游离氨基酸的代谢环节也可调控氨基酸裂解酶、氨基酸转氨酶等酶基因的表达，进而影响蔬菜的氧化特性和感官品质，在一定程度上维持蔬菜的

抗氧化活性^[29]。

1.3.4 发酵对蔬菜中甘露醇的影响 甘露醇是由 LAB 通过异型发酵果糖和蔗糖产生,可作为一种抗氧化剂和非代谢性甜味剂。它具有清爽的口感,能提高发酵蔬菜的鲜味,其含量随发酵时间的延长而增加^[30-31]。研究表明,副干酪乳杆菌可通过诱导甘露醇的形成来增加东北酸菜中的抗氧化成分含量和甜度^[21];肠膜明串珠菌能在发酵开始阶段分解游离的糖类物质产生甘露醇,丰富泡菜的总体风味^[30]。此外,甘露醇和乙酸的协同作用可有效改善发酵泡菜的口感^[32]。

1.3.5 发酵对蔬菜中主要挥发性物质的影响 发酵蔬菜的挥发性风味成分对最终产品的品质及消费者的接受度至关重要。其中,醇类是发酵蔬菜中主要的挥发性化合物。酸菜中的 3-苯丙醇、芳樟醇和苯乙醇是其主要的芳香成分,赋予酸菜铃兰香和花香味;葵花醇、2-苯乙醇分别赋予泡椒以苹果香、玫瑰花香味;而 2-甲基-1-丁醇赋予萝卜醇厚的香气^[33-34]。明串珠菌、片球菌和乳球菌是蔬菜发酵过程中的优势乳酸菌属。研究^[11,35]表明,发酵阶段的明串珠菌丰度与 1-己醇、芳樟醇和 3-苯丙醇含量均呈显著正相关;而片球菌和乳球菌丰度与 1-己醇含量呈正相关。

前期研究^[36]发现,乳球菌和乳酸杆菌富含酯酶,能水解脂类物质(如甘油三酯、双甘油三酯、单甘油三酯)产生游离脂肪酸,丰富产品的整体风味。例如,白菜经 LAB 发酵后产生乙酸乙酯、乙酸甲酯等物质,赋予产品清爽的果香味^[34]。发酵也促使辣椒中丁酸乙酯、乙酸己酯等物质含量升高,使泡椒带有菠萝香、玫瑰香和果香^[35]。此外,LAB 通过调控壬酸与乙醇的反应,使泡菜中产生具有蜡状香气的壬酸乙酯;LAB 能降低发酵葫芦子叶中醛、酮等物质含量,但明显提升其酯类物质含量^[16,36]。

发酵过程中,醛类、酮类及硫化物的保留或富集,是构成发酵蔬菜特征风味的重要保障。对于醛类物质而言,微量的苯甲醛赋予发酵蔬菜以独特的香气;己醛和

(E)-2-己烯醛使酸菜带有青草香味;而乙醛具有自然、清香和水果香的风味,是 LAB 代谢的中间体^[24]。然而,LAB 能将部分醛类还原为醇或氧化为酸,使发酵后期醛类物质减少。此外,酮类物质的气味较强烈,主要通过 LAB 氧化或脱羧途径产生。例如,具有酮香和青草香的 3-辛酮是江西腌菜中的关键香气物质^[37]。同时,发酵过程也会破坏原料的细胞结构,胞内的酶进而作用于前体硫代葡萄糖苷,产生具有独特辛辣气味的挥发性硫化物^[38]。其中,二烯丙基二硫化物、二烯丙基三硫化物、二甲基三硫化物和甲基二硫化物是泡菜中主要的挥发性硫化物^[38-39]。发酵红萝卜中的哌啶-2-硫酮和二甲基三硫醚具有独特硫磺味和辛辣味,其生成量与乳酸球菌和乳酸杆菌呈正相关^[40-41]。

烯萜类化合物也是一种代表性的香味物质,其来自糖苷经酸/酶水解作用的水解释放过程,含量随着发酵时间的延长而显著增加。具体来说,LAB 代谢分泌的乳酸菌糖苷酶可水解烯萜的糖苷键,促进其释放^[42]。研究^[10]发现,在辣椒发酵期间,柠檬烯、乙烯和十一烯等烯萜类化合物的含量逐渐增加,使泡椒的香气、色泽和滋味不断得以改善。综上所述,LAB 可利用原料中的各类营养素生成挥发性物质,以减轻原料辛辣感及不良风味,赋予发酵蔬菜特殊风味。

2 LAB 影响发酵蔬菜风味形成的主要代谢途径

蔬菜中营养物质含量丰富,加之不同菌种的发酵特性各异,导致发酵蔬菜的风味化合物含量不同,改变产品中原有呈味物质的比重,从而形成独特的风味^[43-44]。LAB 发酵是一个复杂的动态代谢过程,其影响发酵蔬菜风味的作用途径如图 1 所示。研究^[45]表明,LAB 主要通过碳水化合物代谢途径促进蔬菜发酵过程中挥发性化合物的产生。由于发酵环节的底物、LAB 种类和环境条件各异,致使 LAB 可通过不同途径(同型发酵和异型发酵)

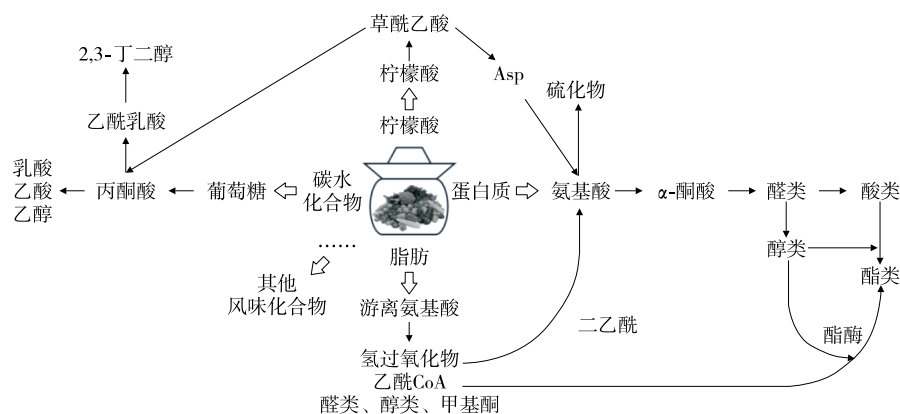


图 1 发酵蔬菜中风味物质形成的主要途径

Figure 1 The main pathway of flavor formation in fermented vegetables

代谢碳水化合物,进而产生相应的代谢产物。具体而言,糖类物质在酶的作用下产生丙酮酸,随后被还原为乙醇、乙酸和乳酸等风味成分^[46]。LAB(如乳球菌)可利用蔬菜中的柠檬酸与糖类化合物进行共同代谢。柠檬酸在柠檬酸裂解酶的作用下转化为草酰乙酸和醋酸酯。草酰乙酸被草酰乙酸脱羧酶转化为二氧化碳和丙酮酸。随后丙酮酸进一步分解产生挥发性化合物,如 2,3-丁二醇、二乙酰和乙酰等,丰富产品的整体香气^[46-47]。乳杆菌具有水解蛋白质的能力,能将其降解成多肽和氨基酸,在酶的作用下,游离氨基酸可进一步转化为醇、醛、酸、酯等物质。但蔬菜中的蛋白质占比较小,对风味的影响相对较低。另外,LAB 分泌的酶系也能将原料中的营养素水解成风味成分前体物质,并将其转化成香气化合物。

2.1 LAB 代谢碳水化合物的主要途径

LAB 代谢碳水化合物的过程极其复杂,主要通过糖代谢途径将蔬菜中的糖类化合物分解为乳酸及其他风味物质。如图 2 所示,根据 LAB 代谢过程和产物的不同,可将乳酸发酵分为同型发酵和异型发酵两类途径。蔬菜发酵前期一般以异型乳酸发酵为主,在此阶段,柠檬酸裂解酶可将柠檬酸转化为草酰乙酸和醋酸,通过进一步代谢产生的 6-葡萄糖酸是丙酮酸形成的重要中间体。随后,6-葡萄糖酸经氧化异构转变为 5-磷酸木酮糖,其在相关酶作用下分别生成乙酰磷酸和 3-磷酸甘油醛。乙酰磷酸能被进一步还原为乙酸和乙醇,而 3-磷酸甘油醛则被还原成乳酸^[43]。而在同型发酵过程中,糖类物质通过糖酵解途径产生丙酮酸,其随后被还原为乳酸^[50]。此外,大部分 LAB(如丁二酮乳酸链球菌、嗜柠檬酸明串珠菌等)能与碳水化合物共同代谢,利用柠檬酸产生丁二酮和乙偶姻,最终产生 2,3-丁二醇、二乙酰和乙腈等挥发性化合物,赋予蔬菜独特的醇香、奶油香^[48-49]。同时,LAB 还能利用蔬菜中的糖醇等物质进行代谢,它可在具有特异性磷酸转移酶系统(PTS)的作用下将糖醇运输至胞内,随后进行磷酸化等生化反应,最终生成乳酸、乙醇、乙酸等产物^[48]。研究^[49,51]表明,乳球菌可以在 α -戊酮二酸介质中通过天冬氨酸代谢或丙氨酸代谢产生乙醛和双乙酰,进而影响

发酵蔬菜产品的整体风味。

2.2 LAB 代谢蛋白质的主要途径

LAB 具有水解蛋白质的能力,可将其降解成肽和氨基酸,形成发酵蔬菜的基本风味。作为挥发性芳香化合物的前体物质,呈味氨基酸主要包括酸味氨基酸[酪氨酸(Tyr)、苯丙氨酸(Phe)、丙氨酸(Ala)]、苦味氨基酸[组氨酸(His)、亮氨酸(Leu)、精氨酸(Arg)、苯丙氨酸(Phe)、异亮氨酸(Ile)、赖氨酸(Lys)、缬氨酸(Val)]、甜味氨基酸[丙氨酸(Ala)、甘氨酸(Gly)、苏氨酸(Thr)、丝氨酸(Ser)、脯氨酸(Pro)]、鲜/咸味氨基酸[谷氨酸(Glu)、天冬氨酸(Asp)]^[52]。其中,蛋氨酸、芳香族氨基酸和支链氨基酸的生物转化对风味至关重要。氨基酸在碳硫裂解酶的作用下水解形成硫醇,其随后可转化为含硫化合物^[29]。前期研究^[53]发现,一些 LAB 能够利用体内的酶如 C-S 裂合酶、谷氨酸脱氢酶(GDH)、 α -酮酸脱氢酶和甲硫氨酸氨基转移酶等将 L-蛋氨酸转化成甲硫醇、二甲基二硫醚、十六烷酸、亚油酸乙酯等挥发性含硫化合物。乳酸杆菌具有调控氨基酸向酮类和羧基化合物转化的作用,并将其转化为羧酸。然而,蔬菜中的蛋白质含量相对较低,且仅有少量蛋白质能在 LAB 作用下水解生成风味物质,因此,蛋白质对发酵蔬菜的风味影响程度相对较低。

2.3 发酵过程中相关酶对风味的影响

蔬菜发酵期间,LAB 分泌的酶主要通过碳水化合物代谢来参与风味的形成过程(图 3)。前期研究^[54]发现,LAB 体内存在编码碳水化合物利用酶(如代谢葡萄糖、蔗糖和果糖的酶)的基因,能以葡萄糖、蔗糖和其他单糖作为发酵的主要碳源。

另外,有机酸在发酵蔬菜中含量丰富,有助于形成产品独特的酸度、口味和风味^[3]。其在发酵过程中的代谢途径如下:参与物质代谢的葡萄糖经葡萄糖磷酸变位酶、葡萄糖-6-磷酸异构酶、果糖-1,6-二磷酸酶等酶的作用生成丙酮酸;其随后被 LAB 基因组中乳酸脱氢酶基因编码的乳酸脱氢酶转化为乳酸。同时,LAB 也可通过丙酮酸激酶、磷酸乙酰基转移酶、醋酸激酶以乙酰 A 为底物产生乙酸^[55]。此外,LAB 中还含有利用乙酸生成乙醛和乙醇

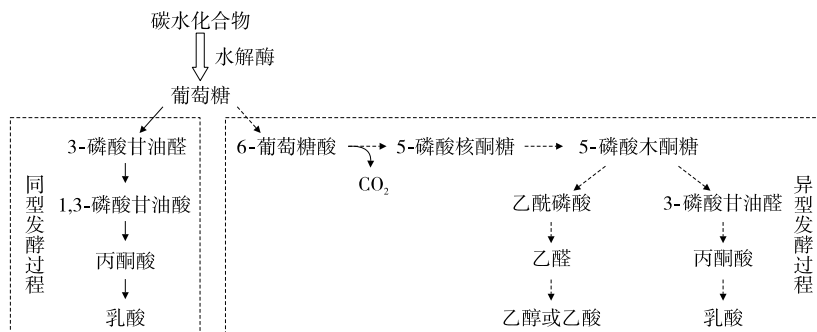
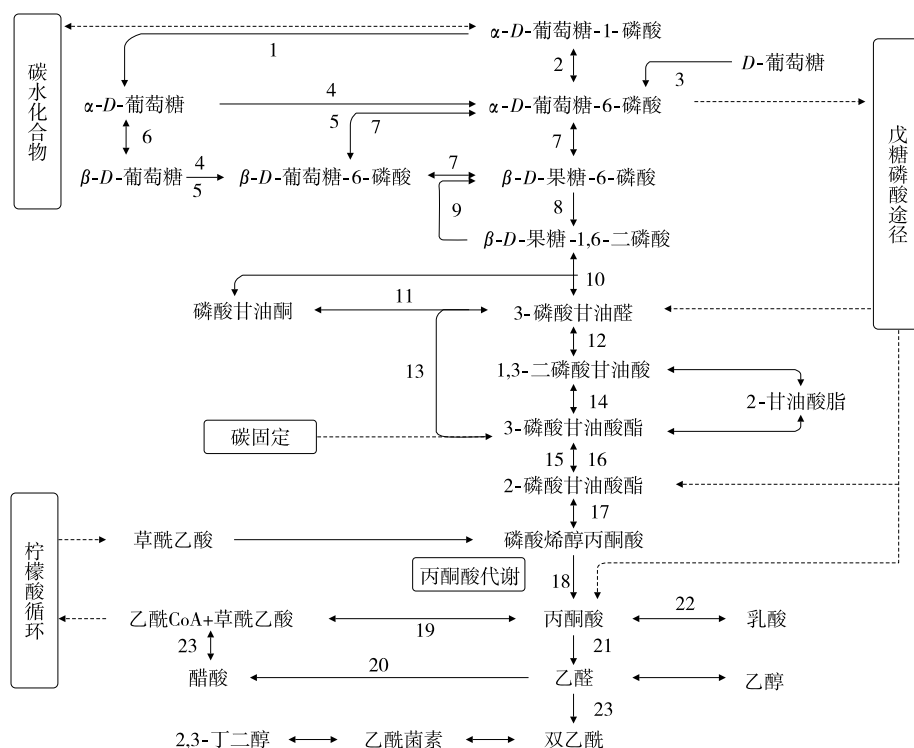


图 2 LAB 代谢碳水化合物的主要途径

Figure 2 The main pathway of carbohydrate metabolism by LAB



1. 葡萄糖-1-磷酸酶 2. 葡萄糖磷酸变位酶 3. PTS 系统, 糖特异性 IIA 成分 4. 多磷酸盐葡萄糖激酶 5. 葡萄糖激酶 6. 醛糖-1-差向异构酶 7. 葡萄糖-6-磷酸异构酶 8. 果糖-1,6-二磷酸酶 9. 6-磷酸果糖激酶 10. 果糖-酮糖醛缩酶 11. 磷酸丙糖异构酶 (TIM) 12. 甘油醛-3-磷酸脱氢酶 13. 甘油醛-3-磷酸脱氢酶(NADP⁺) 14. 磷酸甘油酸酯激酶 15. 2,3-二磷酸甘油酸-依赖性磷酸甘油酸转化酶 16. 磷酸甘油酸变位酶 17. 烯醇酶 18. 丙酮酸激酶 19. 丙酮酸脱氢酶复合体 20. 乙醛脱氢酶 21. 丙酮酸脱羧酶 22. 乳酸脱氢酶 23. α -乙酰羟丁酸合成酶

图3 发酵过程中相关酶参与风味形成的代谢途径

Figure 3 Metabolic pathways of related enzymes involved in flavor formation during fermentation

的酶类基因,如乙醛脱氢酶和乙醇脱氢酶,这些酶之间的相互作用影响蔬菜发酵过程中的酸浓度变化。

发酵蔬菜中的醇类化合物也能赋予产品独特的风味。在乙醛脱氢酶和乙醇脱氢酶的催化下,乙酸转化为乙醛和乙醇,乙醛也可进一步氧化脱氢成乙酸。同时,丙酮酸代谢产生的乙酸在 α -乙酰羟丁酸合成酶的作用下进入柠檬酸循环,产生乙酰辅酶A和草酰乙酸进入后续代谢过程。此外,脂肪酸衍生得到的醛类和醇类可以通过支链氨基酸的降解途径,产生相应的 α -酮酸,随后由醇脱氢酶、甲基乙二醛还原酶进一步进行脱羧和还原反应产生^[54]。例如,已从发酵蔬菜中分离的LAB体内鉴定出脂肪酸代谢相关酶,包括乙酰辅酶A羧化酶和脂肪酸合成酶,其催化辛酸、癸酸和十六酸的产生^[56]。因此,LAB通过利用原料自身含有的营养素代谢产生相关酶,进而参与发酵蔬菜的风味形成过程。

3 结论

风味成分能反映发酵蔬菜的品质,而如何稳定发酵蔬菜呈味物质是保证其质量稳定的关键。目前,由于对

蔬菜发酵过程中乳酸菌的主要代谢机理研究尚不够深入,导致其在规模化生产过程中出现产品风味不稳定、安全性低及稳定性差等问题。此现象一方面阻碍蔬菜的产业化发酵,另一方面也限制成品的品质提升,进而制约发酵蔬菜的高质量发展。基于此,可针对以下方面进行研究:①随着现代生物技术的发展,应充分利用多组学技术研究乳酸菌群落的组成、功能特性和生物代谢过程,挖掘呈味优势乳酸菌及其代谢通路,进而明确优势乳酸菌对特征性风味化合物的作用机制;②中国生产发酵蔬菜的手工作坊较多,质量良莠不齐,某些作坊会通过添加过量色素、苯甲酸钠等化学防腐剂来提高产品色泽和保质期,严重危害人体健康,应注重食品生产过程中的安全问题,筛选并应用蔬菜中具有天然防腐效果的优势生物因素。③研究环境因子,如pH值、盐、水分和温度等对关键风味化合物的调节机制。④发酵蔬菜的加工有一定群众基础、市场需求和制造能力,但其深加工过程尚无明确的标准,不利于其产业化质量的稳定,应导入现代食品安全控制体系,对原料的生态环境、种植过程等全过程进行质量

控制,以保证产品的安全性,达到发酵蔬菜的规范化、规模化、安全化生产。

参考文献

- [1] 任惠敏, 张博, 邓娜, 等. 预制湘菜主要潜在危害物及减控技术研究进展[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(4): 118-130.
REN H M, ZHANG B, DENG N, et al. Research progress on main potential hazards and reduction and control technology of Hunan-flavored prepared dishes [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 118-130.
- [2] 王建辉, 刘妙, 陈彦荣, 等. 预制湘菜产业现状及发展路径分析[J]. 中国食品学报, 2022, 22(10): 20-26.
WANG J H, LIU M, CHEN Y R, et al. Present situation and development path analysis of prepared Hunan vegetable industry[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10): 20-26.
- [3] TAMANG J P, THAPA N, TAMANG B, et al. Microorganisms in fermented foods and beverages [J]. Health benefits of fermented foods and beverages, 2020, 6(4): 106.
- [4] TAMANG J P, WATANABE K, HOLZAPFEL W H. Review: Diversity of microorganisms in global fermented foods and beverages[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 337-365.
- [5] JUNG J Y, LEE S H, JIN H M, et al. Metatranscriptomic analysis of lactic acid bacterial gene expression during kimchi fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 163 (2/3): 171-179.
- [6] 张郁松. 接种乳酸菌发酵泡辣椒工艺研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(1): 101-104.
ZHANG Y S. Study on fermentation technology of pickled pepper by *Lactobacillus*[J]. China Condiment, 2021, 46(1): 101-104.
- [7] 周先容, 兰凌霞, 汤艳燕, 等. 泡菜中乳酸菌的分离鉴定及体外抗性筛选[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 6-10.
ZHOU X R, LAN L X, TANG Y Y, et al. Isolation and identification of lactic acid bacteria from fermented vegetables and in vitro resistance screening[J]. Food & Machinery, 2017, 33(10): 6-10.
- [8] PÉREZ-DÍAZ I M, HAYES J, MEDINA E, et al. Reassessment of the succession of lactic acid bacteria in commercial cucumber fermentations and physiological and genomic features associated with their dominance[J]. Food Microbiology, 2017, 63: 217-227.
- [9] HE Z, CHEN H Y, WANG X Y, et al. Effects of different temperatures on bacterial diversity and volatile flavor compounds during the fermentation of suancai, a traditional fermented vegetable food from northeastern China[J]. LWT, 2020, 118: 108773.
- [10] 张冬梅. 接种发酵萝卜及挥发性风味物质的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009: 61-69.
ZHANG D M. Study on inoculating fermented radish and its volatile flavor substances [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009: 61-69.
- [11] 袁华伟, 尹礼国, 徐洲, 等. 5 种蔬菜中风味物质成分分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 192-196.
YUAN H Y, YI L G, XU Z, et al. Analysis of flavor components in five vegetables [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 192-196.
- [12] 赵肖肖, 王丹, 马越, 等. 温度及包装材料对干辣椒贮藏期间品质的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 182-184.
ZHAO X X, WANG D, MA Y, et al. Effect of temperature and packing material on quality of dehydrated hot pepper during storage[J]. Food & Machinery, 2013, 29(5): 182-184.
- [13] 张锡茹, 关慧, 邢少华, 等. 泡菜微生物演替与风味物质变化的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 294-305.
ZHANG X R, GUAN H, XING S H, et al. Advances in research on microbial succession and flavor changes in pickles [J]. Food Science, 2021, 42(23): 294-305.
- [14] SHI X N, ZHOU X M, CHU X Y, et al. Allicin improves metabolism in high-fat diet-induced obese mice by modulating the gut microbiota[J]. Nutrients, 2019, 11(12): 2 909-2 923.
- [15] EZZAT S M, EZZAT M I, OKBA M M, et al. The hidden mechanism beyond ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) potent in vivo and in vitro anti-inflammatory activity [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2017, 214: 113-123.
- [16] 张永生, 刘冬敏, 王建辉, 等. 植源性天然产物在食品中降生物胺作用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(3): 315-324.
ZHANG Y S, LIU D M, WANG J H, et al. Advances in understanding the effects of plant-derived natural products on biogenic amine reduction in foods[J]. Food Science, 2022, 43(3): 315-324.
- [17] LIANG H P, HE Z, WANG X Y, et al. Bacterial profiles and volatile flavor compounds in commercial Suancai with varying salt concentration from Northeastern China [J]. Food Research International, 2020, 137: 109384.
- [18] YANG X, HU W, XIU Z, et al. Microbial dynamics and volatilome profiles during the fermentation of Chinese northeast sauerkraut by *Leuconostoc mesenteroides* ORC 2 and *Lactobacillus plantarum* HBUAS 51041 under different salt concentrations [J]. Food Research International, 2020, 130: 108926.
- [19] YOU S Y, YANG J S, HYUN K S, et al. Changes in the physicochemical quality characteristics of cabbage kimchi with respect to storage conditions[J]. Journal of Food Quality, 2017, 2 017: 9562981.
- [20] HEE L S, WOONG W T, WOON R S, et al. Unraveling microbial fermentation features in kimchi: From classical to meta-omics approaches[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, 104 (18): 7 731-7 744.

- [21] YANG X Z, HU W Z, XIU Z L, et al. Comparison of northeast sauerkraut fermentation between single lactic acid bacteria strains and traditional fermentation[J]. Food Research International, 2020, 137: 109553.
- [22] XIAO Y S, HUANG T, HUANG C L, et al. The microbial communities and flavour compounds of Jiangxi yancai, Sichuan paocai and Dongbei suancai: Three major types of traditional Chinese fermented vegetables [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 121: 108865.
- [23] JUNG J Y, LEE S H, LEE H J, et al. Effects of *Leuconostoc mesenteroides* starter cultures on microbial communities and metabolites during kimchi fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2012, 153(3): 378-387.
- [24] NIU C T, XUE Y, JIA Y, et al. Analysis of bacterial community dynamics in the manufacture process of lajiaojiang (red chili paste)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 122: 108976.
- [25] 皮佳婷, 刘冬敏, 王建辉, 等. 乳酸菌降解泡菜中亚硝酸盐的机制及应用研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 301-307.
- PI J T, LIU D M, WANG J H, et al. Advances on nitrite degradation mechanisms of lactic acid bacteria in pickles[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 301-307.
- [26] THOMAS B. Lactic acid bacteria as starter cultures: An update in their metabolism and genetics[J]. AIMS Microbiology, 2018, 4(4): 665-684.
- [27] 徐亚洲, 熊涛, 谢书虎, 等. 食窦魏斯氏菌 NCU034005 与柠檬明串珠菌 NCU027003 对泡菜代谢物及风味的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 7-14.
- XU Y Z, XIONG T, XIE S H, et al. Effects of *Weissella cibaria* NCU034005 and *Leuconostoc citreum* NCU027003 on paocai metabolites and flavor[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 7-14.
- [28] FILANNINO P, AZZI L, CAVOSKI I, et al. Exploitation of the health-promoting and sensory properties of organic pomegranate (*Punica granatum* L.) juice through lactic acid fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 163 (2/3): 184-192.
- [29] MCAULIFFE O, KILCAWLEY K, STEFANOVIC E. Symposium review: Genomic investigations of flavor formation by dairy microbiota[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(1): 909-922.
- [30] CHOI Y J, YONG S, LEE M J, et al. Changes in volatile and non-volatile compounds of model kimchi through fermentation by lactic acid bacteria[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 105: 118-126.
- [31] CUI S M, ZHAO N, LU W W, et al. Effect of different *Lactobacillus* species on volatile and nonvolatile flavor compounds in juices fermentation[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(7): 2 214-2 223.
- [32] LUO Y L, LIU Y L, REN T, et al. Sichuan paocai fermented by mixed: tarter culture of lactic acid bacteria[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(5): 5 402-5 409.
- [33] LIANG H P, HE Z, WANG X Y, et al. Effects of salt concentration on microbial diversity and volatile compounds during suancai fermentation[J]. Food Microbiology, 2020, 91: 103537.
- [34] SMID E J, KLEEREBEZEM M. Production of aroma compounds in lactic fermentations [J]. Annual Review of Food Science & Technology, 2014, 5(1): 313-326.
- [35] RAFFAELLA D C, FILANNINO P, GOBBETTI M. Lactic acid fermentation drives the optimal volatile flavor-aroma profile of pomegranate juice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 248: 56-62.
- [36] 任婷婷, 岳田利, 魏欣, 等. 益生菌发酵苹果浆工艺优化及发酵前后挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 87-93.
- REN T T, YUE T L, WEI X, et al. Process optimization for production of fermented apple pulp with probiotics and analysis of volatile flavor components before and after fermentation[J]. Food Science, 2019, 40(8): 87-93.
- [37] KAMDA A G S, RAMOS C L, FOKOU E, et al. In vitro determination of volatile compound development during starter culture-controlled fermentation of cucurbitaceae cotyledons [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 192: 58-65.
- [38] CHEN W T, KARANGWA E, YU J Y, et al. Characterizing red radish pigment off-odor and aroma-active compounds by sensory evaluation, gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry and partial least square regression [J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10(7): 1 337-1 353.
- [39] LEE J J, CHOI Y J, LEE M J, et al. Effects of combining two lactic acid bacteria as a starter culture on model kimchi fermentation[J]. Food Research International, 2020, 136: 109591.
- [40] RAO Y, QIAN Y, TAO Y F, et al. Characterization of the microbial communities and their correlations with chemical profiles in assorted vegetable Sichuan pickles [J]. Food Control, 2020, 113: 107174.
- [41] TOMISLAV P, MARIE-BERNADETTE M, AURÉLIE L, et al. *Lactobacillus* and *Leuconostoc* volatilomes in cheese conditions [J]. Applied microbiology and biotechnology, 2016, 100(5): 2 335-2 346.
- [42] MI L S, YOUNG L J, JEUNG C Y, et al. Determination of volatiles and carotenoid degradation compounds in red pepper fermented by *Lactobacillus parabuchneri* [J]. Journal of food science, 2018, 83 (8): 2 083-2 091.
- [43] CHEN C, LU Y Q, YU H Y, et al. Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice influence of 4 lactic acid bacteria[J]. Food Bioscience, 2019, 27: 30-36.
- [44] 全琦, 刘伟, 左梦楠, 等. 乳酸菌发酵果蔬汁的风味研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 315-323.

- QUAN Q, LIU W, ZUO M N, et al. Advances in the flavor of fruit and vegetable juices fermented by lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 315-323.
- [45] 母应春. 泡椒发酵微生物相关性研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009: 43-49.
- MU Y C. Study on microbial correlation of pickled pepper fermentation[D]. Guiyang: Guizhou University, 2009: 43-49.
- [46] 那淑敏, 贾士芳, 陈秀珠, 等. 嗜酸乳杆菌发酵代谢产物分析[J]. 中国微生态学杂志, 1999(5): 12-14
- NA S M, JIA S F, CHEN X Z, et al. Analysis of fermentation products produced by *Lactobacillus acidophilus*[J]. Chinese Journal of Microecology, 1999(5): 12-14
- [47] OYLUM E, JAGER V C L D, MACIEJ S, et al. Multifactorial diversity sustains microbial community stability[J]. The ISME Journal, 2013, 7(11): 2 126-2 136.
- [48] 孙建光, 高俊莲. 乳酸菌对糖和糖醇的分解代谢及其致龋性[J]. 口腔医学, 2007(7): 384-386.
- SUN J G, GAO J L. Catabolism of sugar and sugar alcohols by lactic acid bacteria and their cariogenic properties[J]. Stomatology, 2007(7): 384-386.
- [49] BARS D L, YVON M. Formation of diacetyl and acetoin by *Lactococcus lactis* via aspartate catabolism[J]. Journal of Applied Microbiology, 2007, 104(1): 171-177.
- [50] 徐云凤, 张欣, 褚泽军, 等. 一株具有高效抑菌活性乳酸菌的分离鉴定及生长特性研究[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 12-14.
- XU Y F, ZHANG X, CHU Z J, et al. Isolation, identification and growth characteristics of a strain of lactic acid bacteria with efficient antimicrobial activity[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 12-14.
- [51] 燕平梅, 薛文通. 乳酸菌与发酵蔬菜的风味[J]. 中国调味品, 2005(2): 12-15.
- YAN P M, XUE W T. Flavor of lactic acid bacteria and fermented vegetables[J]. China Condiment, 2005(2): 12-15.
- [52] POTHAKOS V, VUYST L D, ZHANG S J, et al. Temporal shotgun metagenomics of an Ecuadorian coffee fermentation process highlights the predominance of lactic acid bacteria[J]. Current Research in Biotechnology, 2020, 2: 14-33.
- [53] HANNIFFY S B, PELÁEZ C, MARTÍNEZ-BARTOLOMÉ M A, et al. Key enzymes involved in methionine catabolism by cheese lactic acid bacteria[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 135(3): 223-230.
- [54] XIONG T, LI J B, LIANG F, et al. Effects of salt concentration on Chinese sauerkraut fermentation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 169-174.
- [55] LIU S P, CHEN Q L, ZOU H J, et al. A metagenomic analysis of the relationship between microorganisms and flavor development in Shaoxing mechanized huangjiu fermentation mash [J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 303: 9-18.
- [56] LIU D Q, ZHANG C C, ZHANG J M, et al. Metagenomics reveals the formation mechanism of flavor metabolites during the spontaneous fermentation of potherb mustard (*Brassica juncea* var. *multiceps*) [J]. Food Research International, 2021, 148: 110622.
- (上接第 216 页)
- [37] ZAREZADEH M R, ABOONAJMI M, VARNAMKHAHI M G, et al. Olive oil classification and fraud detection using E-nose and ultrasonic system[J]. Food Analytical Methods, 2021, 14(10): 2 199-2 210.
- [38] WEI X, SHAO X, WEI Y, et al. Rapid detection of adulterated peony seed oil by electronic nose[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(6): 2 152-2 159.
- [39] MILDNER-SZKUDLARZ S, JELEN H H. The potential of different techniques for volatile compounds analysis coupled with PCA for the detection of the adulteration of olive oil with hazelnut oil[J]. Food Chemistry, 2008, 110(3): 751-761.
- [40] TIAN H, CHEN B, LOU X, et al. Rapid detection of acid neutralizers adulteration in raw milk using FGC E-nose and chemometrics [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16: 2 978-2 988.
- [41] SUN X, ZHANG F, GUTIÉRREZ-GAMBOA G, et al. Real wine or not? Protecting wine with traceability and authenticity for consumers: Chemical and technical basis, technique applications, challenge, and perspectives[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(24): 6 782-6 808.
- [42] 乔森, 张磊, 母芳林. 基于电子鼻与 LightGBM 算法判别葡萄酒品种的研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 76-79.
- QIAO M, ZHANG L, MU F L. Research on discriminating wine varieties based on electronic nose and LightGBM algorithm[J]. Food & Machinery, 2020, 36(5): 76-79.
- [43] RÓZANSKA A, DYMERSKI T, NAMIESNIK J. Novel analytical method for detection of orange juice adulteration based on ultra-fast gas chromatography [J]. Monatshefte für Chemie: Chemical Monthly, 2018, 149(9): 1 615-1 621.
- [44] 陈晓明, 初叶心, 乔江涛, 等. 蜂蜜品种识别和掺假鉴别的研究进展[J]. 食品工业, 2021, 41(2): 225-229.
- CHEN X M, CHU Y X, QIAO J T, et al. Research progress on variety identification and adulteration identification of honey[J]. Food Industry, 2021, 41(2): 225-229.
- [45] 李秀, 桑潘婷, ABIOLA D S, 等. 驴腿肉与其他畜腿肉挥发性风味物质差异研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 50-54.
- LI X, SANG P T, ABIOLA D S, et al. Comparative study on volatile flavor among the leg meat from donkey and other livestock animals[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 50-54.
- [46] TAHRI K, TIEBE C, BARI N E, et al. Geographical classification and adulteration detection of cumin by using electronic sensing coupled to multivariate analysis[J]. Procedia Technology, 2017, 27: 240-241.