

黑蒜加工过程中风味物质变化研究进展

Research progress on the changes in flavor substances during black garlic processing

毛涵涛^{1,2,3} 李 慧^{1,2,3} 尹世鲜^{2,3} 荣智兴^{2,3} 王建辉^{1,2,3}

MAO Hantao^{1,2,3} LI Hui^{1,2,3} YIN Shixian^{2,3} RONG Zhixing^{2,3} WANG Jianhui^{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. 湖南省预制菜工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114; 3. 平江县劲仔食品有限公司, 湖南 岳阳 414517)

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Prepared Dishes, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Pingjiang Jinzai Food Co., Ltd., Yueyang, Hunan 414517, China)

摘要:黑蒜是由新鲜大蒜在高温高湿条件下发酵制成,此过程发生的多种化学反应可使大蒜的刺激气味逐渐消失,并形成黑蒜的独特酸甜风味。文章围绕黑蒜加工过程中化学成分和风味物质的变化进行综述,探讨了影响黑蒜香气形成的关键因素,并解析了黑蒜的风味特性。

关键词:黑蒜;化学成分;风味物质;发酵

Abstract: Black garlic is produced through the fermentation of fresh garlic under conditions of high temperature and humidity, wherein various chemical reactions occur, gradually diminishing the pungent odor associated with garlic and imparting the distinctive sweet and sour flavor characteristic of black garlic. This article reviews the changes in chemical components and flavor substances during the processing of black garlic, discusses the key factors that influence the evolution of its aroma profile, and analyzes the flavor characteristics of black garlic.

Keywords: black garlic; chemical components; flavor substances; fermentation

大蒜因富含有机硫化物,如大蒜素、S-烯丙基-L-半胱氨酸(SAC)等活性成分,因此具有一定的抗菌、抗氧

化、抗癌、抗糖尿病和抗炎等功效^[1]。但大蒜细胞结构被破坏后,这些化合物会转化为烯丙基甲基硫醚和烯丙基硫醇等挥发性物质,使大蒜具有强烈辛辣味和刺激性气味^[2]。发酵可有效降低大蒜的刺激性气味,还能使大蒜质地变得更加柔软,具有嚼劲,类似果冻^[3]。黑蒜是由新鲜大蒜在高温高湿条件下发酵制得。研究^[4]发现,黑蒜能有效缓解糖尿病患者的症状,且其抗癌能力和降低心血管疾病风险的潜力比大蒜更强。文章拟着重介绍黑蒜加工过程中化学成分与风味化合物的转变,聚焦影响其风味形成的关键因素,深度解析黑蒜的风味特性,为黑蒜产品品质提升提供依据。

1 黑蒜加工过程中主要化学成分的变化

黑蒜是由新鲜大蒜在一定温度(50~90℃)和湿度(70%~90%)条件下发酵一定时间而制成的大蒜深加工产品^[5-7]。此发酵过程涉及多种化学反应,包括 Maillard 反应、热降解反应、氧化反应、聚合反应、重排反应、酶催化反应等。这些反应会引起化学成分改变进而影响蒜的风味、色泽和营养特性等。在色泽方面,经发酵,大蒜由白色转变为黑色,故称黑蒜。

如图1所示,大蒜经发酵转变成黑蒜后,其化学成分发生改变,其中还原糖、有机酸、生物碱、多酚、类黑精和5-羟甲基糠醛(5-HMF)等物质含量增加,而水分、脂质、蒜氨酸、多糖等物质含量降低^[8]。其中,多酚、5-HMF、生物碱等的增加可赋予黑蒜更强的抗氧化、抗病毒以及抗癌等功效;大蒜素和蒜氨酸等的减少有助于降低黑蒜的刺激性气味;而发酵产生的类黑精、噻吩、呋喃和吡嗪等则可赋予黑蒜独特的烘烤香味、甜味及焦糖味^[9]。

基金项目:湖南省科技创新领军人才项目(编号:2023RC1056);湖南省预制菜工程技术研究中心项目(编号:2023TP2214);湖南省自然科学基金杰出青年基金项目(编号:2021JJ10007);湖南创新型省份建设专项重点研发项目(编号:2021NK2015)

作者简介:毛涵涛,男,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:2024-03-22 **改回日期:**2024-05-03

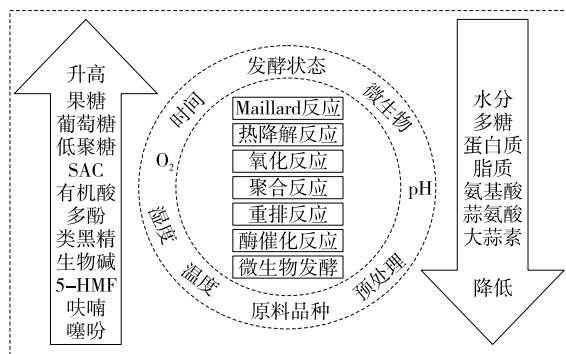


图1 黑蒜加工过程中主要化学成分的变化

Figure 1 Changes in the main chemical components during black garlic processing

1.1 有机硫化物的变化

大蒜具有独特的刺激性香气,主要归因于大蒜素和挥发性硫化物等物质的存在^[10]。如图2所示,大蒜中的有机硫化物在 γ -谷氨酰转氨酶的作用下,脱甘氨酸转化为 γ -L-谷氨酰-S-烯丙基-L-半胱氨酸,后者经脱酰胺或S-氧合作用转化为SAC或 γ -L-谷氨酰-S-烯丙基-L-半胱氨酸-S-氧化物,并最终经S-氧合或脱酰胺反应生成S-烯丙基-L-半胱氨酸亚砷(蒜氨酸)^[11]。蒜氨酸为无色无味物质,在大蒜被捣碎或磨碎后可由蒜氨酸酶水解,产生脱氢丙氨酸和烯丙基磺酸。随后,两个烯丙基磺酸可自发缩合形成大蒜素,后者是大蒜刺激性气味的主要来源^[12]。大蒜素不稳定,会分解为二烯丙基硫醚、二烯丙基二硫醚和二烯丙基三硫醚等挥发性硫化物^[13]。

发酵涉及多种化学反应,因此可改变食品的风味^[14-16]。在发酵过程中,热处理可导致蒜氨酸酶失活,进而减少大蒜素生成,因此,黑蒜无刺激性气味^[17]。此外,大蒜素经反应可转化成稳定无味的S-烯丙基-L-硫基半胱氨酸(SAMC),后者在黑蒜中的含量为大蒜的6倍^[18]。大蒜与黑蒜的含硫物质中均含有二烯丙基二硫醚、二烯丙基三硫醚以及二丙基三硫醚,仅在大蒜中检出了大蒜素,在黑蒜中检出2-乙酰基-1-吡咯啉^[19];而产生大蒜硫磺气味的烯丙基甲基三硫醚、二烯丙基硫醚、二烯丙基二硫醚和二烯丙基三硫醚等含硫化合物含量在黑蒜中逐渐减少^[20],因此,其刺激性气味显著低于大蒜。

1.2 碳水化合物的变化

大蒜中碳水化合物含量约为33%,并以水溶性糖和果聚糖为主。大蒜中的果聚糖属于酮糖类,由果糖和葡萄糖组成,比例约为14:1^[21]。大蒜多糖在发酵过程中会降解成多种单糖(如葡萄糖、果糖等)或双糖^[22]。Li等^[23]指出,黑蒜加工过程中,多糖的总量约减少30%,转变成单糖成分,且主要为果糖、半乳糖和半乳糖醛酸,其摩尔比为307:25:32。此外,高温和低pH可促进蔗糖

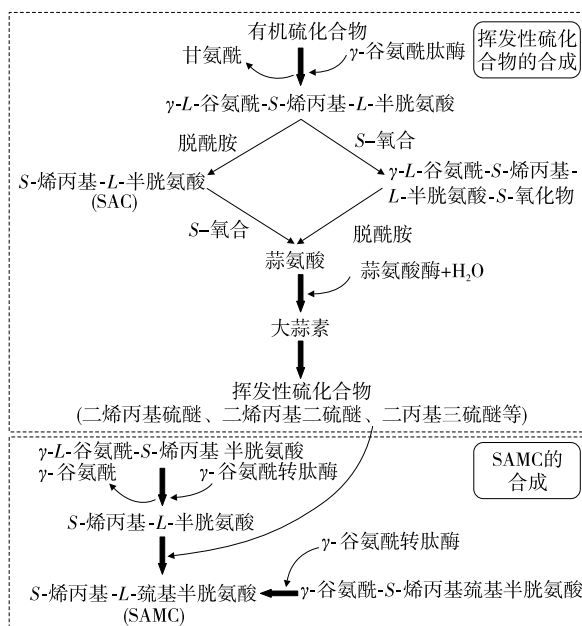


图2 黑蒜加工过程中有机硫化物的变化

Figure 2 Changes in organosulfur compounds during black garlic processing

水解并产生葡萄糖和果糖,从而赋予黑蒜甜味^[24]。黑蒜还具有酸味,是由于在多糖降解的同时有机酸含量也会增加^[25]。

碳水化合物是 Maillard 反应的前体物质。其中,Amadori(N-取代的1-氨基-1-脱氧酮糖)和 Heyns(N-取代的2-氨基-2-脱氧醛糖)是 Maillard 反应的重要中间产物,通常用其评估 Maillard 反应程度,同时也是生成类黑精的前体物质。Amadori 和 Heyns 还可通过酸水解转化成2-呋喃甲基赖氨酸和2-呋喃甲基氨基酸,这两种化合物也是评估黑蒜品质的重要指标^[26]。类黑精是 Maillard 反应的最终产物,为含有聚合氮的高相对分子质量棕色碳水化合物;其又被称为褐色色素,对黑蒜加工后的褐色形成具有重要贡献^[27]。除类黑精外,发酵过程中经 Maillard 反应还可产生5-HMF,可用其评估食品中碳水化合物含量^[28]。此外,5-HMF也可通过焦糖化反应形成。Zhang等^[29]指出,5-HMF可影响黑蒜的颜色,当5-HMF含量为4 g/kg时,大蒜开始变黑。5-HMF含量越高,黑蒜的褐变程度越深,而过高的5-HMF含量会使黑蒜带苦味。

1.3 其他化学成分的变化

黑蒜加工过程中的 Maillard 反应可引发蛋白质变性,并形成多种氨基酸。酸性条件下, Maillard 反应时,蛋白质或肽因酶促或非酶促反应而降解,进而引起黑蒜中一些氨基酸含量增加,如L-丙氨酸、L-缬氨酸、L-异亮氨酸、L-酪氨酸和L-苯丙氨酸等^[24]。Li等^[23]研究发现,大蒜经冷冻预处理后制得的黑蒜样品中氨基酸含量降低了

50.97%,表明黑蒜的氨基酸水平会因加工工艺的不同而变化。

黑蒜加工过程中脂质会因发生氧化而变化。大蒜发酵成黑蒜后,粗脂在高温高湿条件下可转化为醇、醛、酮和内酯等化合物,从而赋予黑蒜丰富的风味,但粗脂含量显著降低^[30]。

2 黑蒜加工过程中特征性风味化合物的变化

食品中,某些风味化合物由于能赋予食品独特的香气,因此被定义为特征性风味化合物^[31-33]。

由表1可知,大蒜比黑蒜的青味和硫磺味更为突出。二烯丙基硫醚、3-乙烯基-1,2-硫杂-4-环己烯、二甲基二硫

醚和二甲基三硫醚等化合物可共同贡献于大蒜的硫磺味或特有的大蒜风味。黑蒜中,烘烤香味和甜香味等物质含量增加,可贡献于黑蒜独特的酸甜风味。黑蒜中含有醛、醇、挥发性硫化物、酮和有机酸等多种香气成分,而大蒜中主要含有挥发性硫化物以及少量的醛、酮^[10]。黑蒜中的挥发性硫化物,如2-乙基-4H-1,3-二噻吩、烯丙基甲基三硫醚、二烯丙基三硫醚、3-乙基-1,2-硫杂-4-环己烯以及二烯丙基硫醚等,可共同赋予黑蒜以大蒜般的香气特性。3-乙基-1,2-硫杂-5-环己烯、二烯丙基二硫醚和二烯丙基硫醚等是大蒜的特征性风味化合物。烯丙基甲基三硫醚和烯丙基甲基二硫醚等是大蒜和黑蒜的共有风味化合物。烯丙基三硫醚和二烯丙基硫醚等挥发性硫化物,因其阈值较低而呈现突出的香气强度^[34]。

表1 大蒜和黑蒜中主要的特征性风味化合物

Table 1 Main characteristic flavor compounds in garlic and black garlic

品种	主要的特征性风味化合物	文献
大蒜	大蒜素、烯丙基硫醇、二烯丙基二硫醚、二甲基二硫醚、3-乙基-4H-1,2-二噻吩	[12]
	烯丙基二硫醚、二烯丙基四硫醚、1,3-二噻吩、2,5-二甲基噻吩、3,4-二甲基噻吩、3-乙基-1,2-硫杂-5-环己烯	[35]
	烯丙基三硫醚、二烯丙基硫醚	[10]
	烯丙基甲基硫醚	[6]
	烯丙基甲基二硫醚、二甲基三硫醚	[36]
	2-乙基-2-丁烯醛	[3]
黑蒜	醋酸、呋喃酮、2(5H)-呋喃酮、5-庚基二氢-2(3H)-呋喃酮、2-呋喃基乙酮、1-羟基-2-丁酮、3-甲硫基丙醛、2-乙酰基-1-吡咯啉、(E,Z)-2,6-壬二烯-1-醇、烯丙基醇、丁内酯、3-甲基丁酸、丙酸、二甲基亚砷	[10]
	2-乙酰基呋喃、5-甲基糠醛、2-甲基丙醛	[3]
大蒜和黑蒜	烯丙基甲基三硫醚、二烯丙基硫醚、二烯丙基三硫醚、3H-1,2-二硫杂环戊烯、3-乙基-1,2-硫杂-4-环己烯	[10]
	2-乙基-4H-1,3-二噻吩	[12]

除含硫化物外,杂环化合物也是构成黑蒜香气活性物质的重要化合物。经测定,2(5H)-呋喃酮(烧焦味)、呋喃酮(焦糖味)、2-乙酰基-1-吡咯啉(烤杏仁味)、2-呋喃基乙酮(香醋味)、5-庚基二氢-2(3H)-呋喃酮(杏味)等化合物为黑蒜所特有,主要赋予其烘烤香味和甜味。此外,黑蒜中还含有1-羟基-2-丁酮(咸味)和3-甲硫基丙醛(熟马铃薯味)两种特有羰基化合物。同时,烯丙基醇(熟蒜味)和(E,Z)-2,6-壬二烯-1-醇(黄瓜味)等化合物的形成也有助于黑蒜产生区别于大蒜的特有风味。而3-甲基丁酸(汗味)、乙酸(酸味)和丙酸(辛辣味)等化合物可增加黑蒜酸味。发酵可增强酸味和鲜味,降低咸味^[37],同时大幅减少大蒜苦味,这一变化可能与有机硫化物含量降低有关。

3 黑蒜风味特性的影响因素

大蒜的品种、种植地点、生长条件等因素对其品质具

有重要影响,进而改变黑蒜的感官属性^[38]。此外,大蒜的营养成分、黑蒜的加工工艺(如预处理方式、发酵温度、发酵时间和相对湿度)、加工过程中发生的化学反应(如Maillard反应),以及内生菌等也会影响黑蒜的风味品质^[39]。

3.1 营养因素

3.1.1 碳水化合物 果聚糖是影响黑蒜质量的重要因素之一。黑蒜加工过程中,其果聚糖含量显著降低,降幅为84.6%~99.2%^[40]。黑蒜中果糖含量高于葡萄糖,而果糖是一种酮糖,参与Maillard反应的反应速率低于属于醛糖的葡萄糖^[41]。因此,大蒜经发酵成黑蒜后,其果糖含量一定程度增加,有助于形成黑蒜独特的甜香味^[42]。此外,黑蒜酸味的形成与热处理过程中碳水化合物的发酵降解有很大关联^[42]。碳水化合物发酵降解可生成有机酸,导致pH值降低^[42]。

3.1.2 蛋白质和氨基酸 大蒜中富含蛋白质和必需氨基酸,高温处理会导致黑蒜的蛋白质变性,生成多种游离氨基酸。在黑蒜加工过程中,其酪氨酸、精氨酸和谷氨酸等氨基酸因参与 Maillard 反应合成香气物质而减少^[43]。此外,黑蒜加工过程中亮氨酸和异亮氨酸等支链氨基酸含量显著增加,这些游离氨基酸可与糖类进行 Maillard 反应,生成多种挥发性物质^[39]。

3.2 质量特性

大蒜品种、种植地理位置、气候条件、土壤特性、降水量及栽培管理等因素均可影响大蒜及其黑蒜制品的品质、香气和感官特性^[44]。不同产地大蒜的品质和生理活性化合物,在组成及含量上可能存在明显差异^[45]。相比于普通大蒜发酵制得的黑蒜,有机大蒜发酵制得的黑蒜含有更多的有机硫化物^[45],且黑蒜中 5-HMF 含量会随大蒜生长时间延长而增加^[6]。

3.3 工艺因素

3.3.1 预处理方式 常见的预处理方法包括冷冻、高压和超声波预处理等,且各预处理方式的影响机制各不相同^[46]。冷冻预处理可破坏大蒜细胞结构,促使更多特征性风味化合物生成,从而提升黑蒜的甜味及品质。高压预处理通过应用高压来改变大蒜的物理和化学属性,促进细胞成分转化,进而影响风味物质生成,此方法有助于维持或增强特定风味物质,使黑蒜的味道更加丰富和平衡。超声波预处理通过声波能量增强大蒜细胞壁的透性,有助于成分的提取及转化,并促进香气和风味物质的形成。对大蒜进行冷冻预处理(−20 ℃持续 30 h)、超声波预处理(28 kHz 持续 2 h)和高静水压预处理(300 MPa 持续 15 min),其 SAC 含量分别提高了 6,4,10 倍^[47]。相比于冷冻预处理和超高压预处理,超声波预处理可显著增强大蒜细胞壁的透性,促使细胞内更多的血清 γ -谷氨酰转氨酶流出并与 γ -L-谷氨酰-S-烯丙基-L-半胱氨酸反应,使黑蒜产品中的 SAC 含量更高^[46]。此外,冷冻预处理可使大蒜细胞结构遭受严重破坏,从而加速 Maillard 反应,生成更多的 5-HMF。而欧姆加热(110~130 V, 60~80 ℃)所产生的非热效应有助于果聚糖水解为果糖,进而加速 Maillard 反应,增加 5-HMF 积累^[48]。

3.3.2 发酵温度 发酵温度对黑蒜产品的口感和香气有很大影响^[29]。随着发酵温度的提高,蒜氨酸、SAC 及 γ -L-谷氨酰-S-烯丙基-L-半胱氨酸等香气前体物含量逐渐下降^[49]。当发酵温度<60 ℃时,大蒜尚未完全变黑,且其刺激性香气尚未完全消散;当发酵温度为 70 ℃时,黑蒜的品质和风味均表现较佳^[49];当发酵温度>90 ℃时,大蒜内化学反应加速,还原糖含量降低,可能产生苦味和焦香味,甚至形成有害物质^[39]。在发酵温度 75 ℃、相对湿度 85%的条件下, γ -氨基丁酸、SAC 和 γ -L-谷氨酰-S-烯丙基-L-半胱氨酸等香气前体物质含量变化最为明显,

有助于提升黑蒜的风味品质^[50]。

3.3.3 发酵时间 适当的发酵时间不仅可提高化学反应效率,还可增强黑蒜香气成分的丰富性并维持口感平衡。70~80 ℃发酵 10 d 后,大蒜中的蒜氨酸含量从 11.3 g/kg 降至 2.3 g/kg,大蒜素则减少至不可检测的水平^[51]。大蒜素的减少主要因其转化为 SAMC,而蒜氨酸含量的降低则归因其转化为二烯丙基硫醚、二烯丙基二硫醚及二烯丙基三硫醚等物质。40 ℃发酵 45 d 后,黑蒜中 SAC 含量从 19.6 μ g/g 增至 124.7 μ g/g^[52];此外,发酵第 45 天,黑蒜中的葡萄糖与果糖含量达到峰值^[9]。

3.3.4 相对湿度 黑蒜的外观和褐变程度与相对湿度密切相关。湿度过高会导致褐变速度减慢,因此黑蒜更甜、有机酸含量下降;相反,过低的湿度可能会抑制化学反应,不利于风味化合物的形成,从而导致黑蒜口感过硬^[53]。黑蒜加工的最佳湿度为 80%^[49]。此外,水分活度也会影响 Maillard 反应,进而影响黑蒜中香气化合物的形成^[53]。

3.4 Maillard 反应

Maillard 反应会产生各种杂环物质,如类黑精、噻吩、吡嗪、呋喃酮和呋喃^[54],还会生成 5-HMF 和其他糠醛化合物^[55]。Maillard 反应生成的风味化合物主要赋予黑蒜烘烤香气。例如, Maillard 反应产生的 2(5H)-呋喃酮可赋予黑蒜烘烤香味,而 3-甲硫基丙醛则产生类似熟马铃薯的香味^[10]。Maillard 反应与脂质氧化密切相关,二者协同反应促进了反应中间产物的相互作用,从而丰富了黑蒜的风味。Najman 等^[37]在黑蒜中识别出多种风味化合物,如二硫化碳、2-甲基硫代乙醇、2-甲基-2-丙硫醇、2-辛酮、2-呋喃甲醇、 α -蒎烯、2,3-二甲基吡嗪、5-甲基糠醛和 4-羟基-5-甲基-3-呋喃酮等,其共同赋予黑蒜烘烤、焦糖、烧焦和果香等复杂的香气。此外,5-甲基糠醛和 2-乙酰基呋喃可赋予黑蒜独特的甜香味^[3]。Maillard 反应的中间产物 2-乙酰基吡咯啉是使黑蒜散发宜人香气的主要物质^[56]。由 Maillard 反应产生的呋喃类化合物具甜味特性,是区分黑蒜与大蒜的关键标志物^[20]。大蒜中有机硫化物经发酵主要转化成挥发性含氮化合物,如烯基硫化物、吡啶及吡嗪等,这些化合物在大蒜中并不存在^[12]。

3.5 内生菌

内生菌不仅具有生物防治功能,还可促进植物生长。大蒜自发发酵形成黑蒜,与其内生菌活性相关^[57]。内生菌可以加快大蒜的发酵速度,改善其口感并形成更多功能性化合物,从而延长保质期^[58]。Suharti 等^[59]从黑蒜中分离出欧文氏菌属、假单胞菌属、黄单胞菌属、农杆菌属、罗尔斯通氏菌属、嗜木杆菌属、泛菌属、食酸菌属、伯克氏菌属、棒状杆菌属和链霉菌属等内生菌,可促使葡萄糖降解产生有机酸化合物,如酒石酸、琥珀酸、苹果酸和乙酸等,从而赋予黑蒜酸味。此外,属于内生菌的芽孢杆菌属

可促使菊粉型果聚糖转化为果糖^[27];同时,芽孢杆菌属的数量会随有机硫化物和 5-HMF 含量的增加而降低。

4 结论

大蒜发酵过程涉及多种化学反应,不仅有利于降低刺激性气味,还有助于形成黑蒜独特的酸甜香气。同时,发酵可促使黑蒜形成更多功能活性物质,从而赋予其抗氧化、抗病毒和抗癌等功效。因此,作为大蒜的一种深加工产品,黑蒜具有良好的市场前景和发展潜力。随着风味组学的发展,黑蒜风味物质相关的研究逐渐深入,但还存在诸多问题。后续可建立起完善的黑蒜风味物质可标准化指标和检测方法;并进一步深度探索黑蒜特征性风味物质的产生途径和相互作用关系;以期根据消费者偏好实现黑蒜的风味和营养品质的精准调控。

参考文献

- [1] VERMA T, AGGARWAL A, DEY P, et al. Medicinal and therapeutic properties of garlic, garlic essential oil, and garlic-based snack food: An updated review[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1120377.
- [2] TEDESCHI P, NIGRO M, TRAVAGLI A, et al. Therapeutic potential of allicin and aged garlic extract in alzheimer's disease[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(13): 1 374-1 389.
- [3] MOLINA-CALLE M, PRIEGO-CAPOTE F, DE CASTRO M D L. Headspace-GC-MS volatile profile of black garlic vs fresh garlic: Evolution along fermentation and behavior under heating[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 80: 98-105.
- [4] SARYON O, NANI D, PROVERAWATI A, et al. Immunomodulatory effects of black solo garlic (*Allium sativum* L.) on streptozotocin-induced diabetes in Wistar rats[J]. *Heliyon*, 2021, 7(12): e08493.
- [5] MANOONPHOL K, SUTTISANSANEE U, PROMKUM C, et al. Effect of thermal processes on S-allyl cysteine content in black garlic[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1 227.
- [6] LIU Z, KANG D C, LI X R, et al. Analysis of volatile organic compounds in black garlic made of garlic bulbs after harvesting blanched garlic leaves at different growth periods based on PCA and headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS)[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(5): e16550.
- [7] TAHIR Z, SAEED F, NOSHEEN F, et al. Comparative study of nutritional properties and antioxidant activity of raw and fermented (black) garlic[J]. *International Journal of Food Properties*, 2022, 25(1): 116-127.
- [8] QIU Z C, ZHENG Z J, ZHANG B, et al. Formation, nutritional value, and enhancement of characteristic components in black garlic: A review for maximizing the goodness to humans[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 801-834.
- [9] AOUDEH E, OZ E, KELEBEK H, et al. Black garlic production: The influence of ageing temperature and duration on some physicochemical and antioxidant properties, and sugar content[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2023, 58(7): 3 580-3 590.
- [10] YANG P, SONG H L, WANG L J, et al. Characterization of key aroma-active compounds in black garlic by sensory-directed flavor analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(28): 7 926-7 934.
- [11] WAKAMATSU J, STARK T D, HOFMANN T. Taste-active Maillard reaction products in roasted garlic (*Allium sativum*) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(29): 5 845-5 854.
- [12] ABE K, HORI Y, MYODA T. Characterization of key aroma compounds in aged garlic extract [J]. *Food Chemistry*, 2020, 312: 126081.
- [13] ABE K, HORI Y, MYODA T. Volatile compounds of fresh and processed garlic[J]. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2020, 19(2): 1 585-1 593.
- [14] 侯小艺, 王建辉, 邓娜, 等. 乳酸菌对发酵蔬菜风味影响研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(4): 232-240.
- [15] HOU X Y, WANG J H, DENG N, et al. Research progress on the effect of lactic acid bacteria on the flavor of the fermented vegetables[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(4): 232-240.
- [15] 关倩倩, 熊涛, 谢明勇. 植物基食品乳酸菌发酵技术研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(7): 1-11.
- [15] GUAN Q Q, XIONG T, XIE M Y. Research progress in lactic acid bacteria fermentation technology of plant-based foods[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(7): 1-11.
- [16] LIU M, DENG N, LI H, et al. Characterization and comparison of flavors in fresh and aged fermented peppers: Impact of different varieties[J]. *Food Research International*, 2024, 182: 114187.
- [17] TURAN E, SIMSEK A. Black garlic as a substitute for fresh garlic to reduce off-flavor and enhance consumer acceptance and bioactive properties in cemen paste[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(2): e16246.
- [18] CHEN Z X, XU M J, WANG C, et al. Thermolysis kinetics and thermal degradation compounds of alliin[J]. *Food Chemistry*, 2017, 223: 25-30.
- [19] CZOMPA A, SZOKE K, PROKISCH J, et al. Aged (black) versus raw garlic against ischemia/reperfusion-induced cardiac complications[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(4): 1 017.
- [20] MARTÍNEZ-CASAS L, LAGE-YUSTY M, LÓPEZ-HERNÁNDEZ J. Changes in the aromatic profile, sugars, and bioactive compounds when purple garlic is transformed into black garlic[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(49): 10 804-10 811.
- [21] YUAN H, SUN L, CHEN M, et al. An analysis of the changes on intermediate products during the thermal processing of black garlic

- [J]. Food Chemistry, 2018, 239: 56-61.
- [22] LI N Y, LU X M, PEI H B, et al. Effect of freezing pretreatment on the processing time and quality of black garlic[J]. Journal of Food Process Engineering, 2015, 38(4): 329-335.
- [23] LI M, YAN Y X, YU Q T, et al. Comparison of immunomodulatory effects of fresh garlic and black garlic polysaccharides on raw 264.7 macrophages[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(3): 765-771.
- [24] LIANG T F, WEI F F, LU Y, et al. Comprehensive NMR analysis of compositional changes of black garlic during thermal processing[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(2): 683-691.
- [25] AHMED T, WANG C K. Black garlic and its bioactive compounds on human health diseases: A review[J]. Molecules, 2021, 26(16): 5 028.
- [26] ANDRUSZKIEWICZ P J, D'SOUZA R N, CORNO M, et al. Novel Amadori and Heyns compounds derived from short peptides found in dried cocoa beans[J]. Food Research International, 2020, 133: 109164.
- [27] QIU Z, ZHENG Z, ZHANG B, et al. Characterization of the growth properties of garlic endophytes and their roles in the formation of black garlic[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111537.
- [28] HU H, WANG Y, SHEN M, et al. Effects of baking factors and recipes on the quality of butter cookies and the formation of advanced glycation end products (AGEs) and 5-hydroxymethylfurfural (HMF) [J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 940-948.
- [29] ZHANG X Y, LI N Y, LU X M, et al. Effects of temperature on the quality of black garlic [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 96(7): 2 366-2 372.
- [30] ZAMORA R, HIDALGO F J. Coordinate contribution of lipid oxidation and Maillard reaction to the nonenzymatic food browning[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2005, 45(1): 49-59.
- [31] 孟祥忍, 高子武, 王恒鹏, 等. 主成分分析法构建循环卤煮牛肉挥发性风味强度评价模型[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 29-36.
- MENG X R, GAO Z W, WANG H P, et al. Construction of evaluation model of volatile flavor intensity of cyclic stewed beef based on principal component analysis[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 29-36.
- [32] 赵熙, 余鹏辉, 黄浩, 等. 基于 HS-GC-IMS 法研究干燥方式对黑毛茶挥发性风味物质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(9): 104-111.
- ZHAO X, YU P H, HUANG H, et al. Investigated by HS-GC-IMMS influence of drying method on volatile flavor substances of raw dark tea[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(9): 104-111.
- [33] 张茹茹, 余雄伟, 欧阳辉, 等. 基于 HS-SPME-GC-O-MS 和 E-nose 解析不同热加工方式下西瓜籽特征性香气差异[J]. 食品与机械, 2023, 39(1): 9-17.
- ZHANG R R, YU X W, OUYANG H, et al. Combination of HS-SPME-GC-O-MS and E-nose revealed the characteristic aroma differences of watermelon seeds under various thermal processing treatments[J]. Food & Machinery, 2023, 39(1): 9-17.
- [34] CUI Y W, LIU L X, ZHANG L Y, et al. Geographical differentiation of garlic based on HS-GC-IMS combined with multivariate statistical analysis[J]. Analytical Methods, 2024, 16(3): 465-473.
- [35] MA Y K, SONG D D, WANG Z F, et al. Effect of ultrahigh pressure treatment on volatile compounds in garlic[J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34(6): 1 915-1 930.
- [36] ABE K, MYODA T, NOJIMA S. Identification and characterization of sulfur heterocyclic compounds that contribute to the acidic odor of aged garlic extract[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(3): 1 020-1 026.
- [37] NAJMAN K, KRÓL K, SADOWSKA A. The physicochemical properties, volatile compounds and taste profile of black garlic (*Allium sativum* L.) cloves, paste and powder [J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(9): 4 215.
- [38] MARTINS N, PETROPOULOS S, FERREIRA I. Chemical composition and bioactive compounds of garlic (*Allium sativum* L.) as affected by pre- and post-harvest conditions: A review[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 41-50.
- [39] BEDRNICEK J, LAKNEROVÁ I, LORENC F, et al. The use of a thermal process to produce black garlic: Differences in the physicochemical and sensory characteristics using seven varieties of fresh garlic[J]. Foods, 2021, 10(11): 2 703.
- [40] YUAN H, SUN L J, CHEN M, et al. The comparison of the contents of sugar, Amadori, and Heyns compounds in fresh and black garlic[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(7): 1 662-1 668.
- [41] RÍOS-RÍOS K L, MONTILLA A, OLANO A, et al. Physicochemical changes and sensorial properties during black garlic elaboration: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88: 459-467.
- [42] NAJMAN K, SADOWSKA A, HALLMANN E. Influence of thermal processing on the bioactive, antioxidant, and physicochemical properties of conventional and organic agriculture black garlic (*Allium sativum* L.) [J]. Applied Sciences-Basel, 2020, 10(23): 8 638.
- [43] LIU C F, LU L D, YANG C J, et al. Effects of thermal treatment on alliin and its related sulfides during black garlic processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 159: 113158.
- [44] JAVED M, AHMED W. Black garlic: A review of its biological significance [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(12): e14394.
- [45] SASMAZ H K, SEVINDIK O, ADAL E, et al. Comparative assessment of quality parameters and bioactive compounds of white and black garlic [J]. European Food Research and

- Technology, 2022, 248(9): 2 393-2 407.
- [46] CHAN K H, CHANG C K, GAVAHIAN M, et al. The impact of different pretreatment processes (freezing, ultrasound and high pressure) on the sensory and functional properties of black garlic (*Allium sativum* L.)[J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 6 992.
- [47] CHEN Y T, CHEN Y A, LEE C H, et al. A strategy for promoting γ -glutamyltransferase activity and enzymatic synthesis of S-allyl-(L)-cysteine in aged garlic via high hydrostatic pressure pretreatments[J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126347.
- [48] RÍOS-RÍOS K L, GAYTÁN-MARTÍNEZ M, RIVERA-PASTRANA D M, et al. Ohmic heating pretreatment accelerates black garlic processing[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 151: 112218.
- [49] LIU C F, LU L D, YANG C J, et al. Effects of thermal treatment on alliin and its related sulfides during black garlic processing[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 159: 113158.
- [50] 吴鹏, 刘平香, 王玉涛, 等. 基于超高效液相色谱—三重四极杆串联质谱法的黑蒜加工过程中特征成分变化规律[J]. *食品科学*, 2024, 45(1): 82-90.
- WU P, LIU P X, WANG Y T, et al. Changing pattern of characteristic components in black garlic during processing analyzed by ultra-high performance liquid chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2024, 45(1): 82-90.
- [51] ZHANG Z S, LEI M M, LIU R, et al. Evaluation of allin, saccharide contents and antioxidant activities of black garlic during thermal processing[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2015, 39(1): 39-47.
- [52] BAE S E, CHO S Y, WON Y D, et al. Changes in S-allyl cysteine contents and physicochemical properties of black garlic during heat treatment[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 55(1): 397-402.
- [53] AFZAAL M, SAEED F, RASHEED R, et al. Nutritional, biological, and therapeutic properties of black garlic: A critical review[J]. *International Journal Food Properties*, 2021, 24(1): 1 387-1 402.
- [54] DING Y F, ZHOU X F, ZHONG Y, et al. Metabolite, volatile and antioxidant profiles of black garlic stored in different packaging materials[J]. *Food Control*, 2021, 127: 108131.
- [55] 王聪聪, 郑振佳, 卢晓明, 等. 黑蒜中 5-羟甲基糠醛的生成规律及安全性评价[J]. *食品科学*, 2022, 43(3): 100-105.
- WANG C C, ZHENG Z J, LU X M, et al. Formation and safety evaluation of 5-hydroxymethylfurfural in black garlic[J]. *Food Science*, 2022, 43(3): 100-105.
- [56] LU X M, LI N Y, QIAO X G, et al. Composition analysis and antioxidant properties of black garlic extract[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2017, 25(2): 340-349.
- [57] LU X, LI N, QIAO X, et al. Effects of thermal treatment on polysaccharide degradation during black garlic processing[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 95: 223-229.
- [58] UTAMA G L, RAHMI Z, SARI M P, et al. Psychochemical changes and functional properties of organosulfur and polysaccharide compounds of black garlic (*Allium sativum* L.)[J]. *Current Research in Food Science*, 2024, 8: 100717.
- [59] SUHARTI A R L S W S. Analysis of total acidity toward bacterial and endophytic fungi profile during black garlic processing from garlic (*Allium sativum* L.) and shallot (*Allium ascalonicum* L.)[J]. *Makara Journal of Science*, 2021, 25(3): 188-194.
- (上接第 167 页)
- [16] 张晓芹, 陈礼平, 王慧玉, 等. 不同产地青钱柳 HPLC 指纹图谱的建立[J]. *中国中医药科技*, 2022, 29(3): 393-396.
- ZHANG X Q, CHEN L P, WANG H Y, et al. Establishment of HPLC fingerprints of *Cyclocarya paliurus* from different origins[J]. *China Traditional Chinese Medicine Science and Technology*, 2022, 29(3): 393-396.
- [17] 陈玮玲, 钟培培, 范琳琳, 等. 固相微萃取—气相色谱—质谱分析青钱柳叶挥发性成分[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(22): 52-58.
- CHEN W L, ZHONG P P, FAN L L, et al. Analysis of volatile compounds in *Cyclocarya paliurus* leaves by SPME-GC-MS[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2016, 37(22): 52-58.
- [18] 汪荣斌, 秦亚东, 陈颖, 等. 化学计量学结合指纹图谱评价不同产地青钱柳叶的质量[J]. *中药材*, 2018, 41(4): 917-921.
- WANG R B, QIN Y D, CHEN Y, et al. Chemometrics combined with fingerprinting for evaluating the quality of leaves from different origins of *Cyclocarya paliurus* [J]. *Chinese Materia Medica*, 2018, 41(4): 917-921.
- [19] 杨玉莹, 张丹丹, 罗心遥, 等. 指纹图谱及多成分定量结合化学模式识别法评价不同产地青钱柳质量[J]. *中草药*, 2020, 51(4): 1 082-1 088.
- YANG Y Y, ZHANG D D, LUO X Y, et al. Quality evaluation of *Cyclocarya paliurus* from different habitats by fingerprint and multi-component quantification combined with chemical pattern recognition[J]. *Chinese Herbal Medicine*, 2020, 51(4): 1 082-1 088.
- [20] 甘爽, 陈志丹, 商虎, 等. 基于气相离子迁移谱技术的不同产地乌龙茶挥发性物质分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(9): 68-77.
- GAN S, CHEN Z D, SHANG H, et al. Analysis of volatile substance of oolong tea from different origins based on gas chromatography-ion mobility technique [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(9): 68-77.
- [21] 龚霄, 陈廷慧, 胡小军, 等. 基于 GC-IMS 技术的百香果风味分析[J]. *食品与机械*, 2022, 38(11): 46-52.
- GONG X, CHEN T H, HU X J, et al. Flavor analysis of passion fruit fruit beer based on GC-IMS technique[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(11): 46-52.