

发酵食品加工与贮藏过程中生物胺的控制研究进展

邓斯予, 曹立民, 隋建新*

(中国海洋大学食品科学与工程学院, 青岛 266000)

摘要: 生物胺是在发酵食品及富含氨基酸、蛋白质等强化食品中广泛存在的一类低分子量且具有生物活性的含氮有机化合物, 尤其是在发酵食品中, 生物胺主要是产胺菌作用于发酵食品, 由游离氨基酸发生脱羧反应生成。生物胺的产生会降低食品品质、缩短货架期等问题, 摄入过量生物胺会对消费者的身体健康造成威胁。因此, 建立安全高效的生物胺控制技术, 对于进一步提高发酵食品的质量和安全性具有重要的现实意义。本文在简单介绍生物胺及发酵食品中生物胺形成途径的基础上, 重点综述发酵食品在加工和贮藏过程中通过控制原料、改良发酵菌株、人工调控等策略实现生物胺有效控制的研究进展, 为发酵食品加工和贮藏过程中生物胺的控制提供解决方案和参考。

关键词: 生物胺; 发酵食品; 控制策略; 加工与贮藏

Research progress on the control of biogenic amines in the processing and storage of fermented foods

DENG Si-Yu, CAO Li-Min, SUI Jian-Xin *

(College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China)

ABSTRACT: Biogenic amines are a class of low molecular weight, biologically active nitrogenous organic compounds widely present in fermented foods and fortified foods rich in amino acids and proteins, especially in fermented foods, biogenic amines are mainly produced by the action of amine-producing bacteria on the decarboxylation of free amino acids in fermented foods. The production of biogenic amines can cause deterioration of food quality and shorten shelf life, and excessive intake of biogenic amines can pose a great threat to consumers' health. Therefore, the establishment of safe and efficient biogenic amine control technology is of great practical significance to further improve the quality and safety of fermented foods. Based on a brief overview of biogenic amines and the formation pathways of biogenic amines in fermented foods, this paper focused on the research progress of the effective inhibition of biogenic amines in fermented foods through the control of raw materials, improvement of fermentation strains and artificial regulation during the processing and storage processes, respectively, which provides solutions and references for the control of biogenic amines in the processing and storage of fermented food.

KEY WORDS: biogenic amines; fermented foods; control strategy; processing and storage

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0901005)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD0901005)

*通信作者: 隋建新, 教授, 主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。E-mail: suijianxin@ouc.edu.cn

*Corresponding author: SUI Jian-Xin, Professor, College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China. E-mail: suijianxin@ouc.edu.cn

0 引言

生物胺是一种低分子碱性含氮化合物, 在人体的正常生理代谢过程中会产生微量的生物胺, 主要由微生物产生的氨基酸脱羧酶催化游离氨基酸发生脱羧作用生成^[1]。饮食中适量摄入生物胺具有促进机体生长发育、调节细胞免疫等生理功能^[2], 而过量摄入则会引起不适, 甚至危及生命^[3]。发酵食品是指经过微生物(细菌、酵母和霉菌等)的发酵作用或经过生物酶的作用使加工原料发生重要的生物化学变化及物理变化后制成的食品, 例如, 酸奶、酒酿、酱油等。在加工过程中会形成一些特异性营养因子和风味物质, 例如促进肠道有益菌增殖的基质和生物活性成分^[4], 其有助于提升发酵食品的营养价值和口感^[5]。然而食品在发酵过程中也会形成多种生物胺类物质, 包括组胺、酪胺、尸胺、腐胺等, 过量摄入后会威胁人体健康, 引起血压升高、严重头痛、心力衰竭等症状^[6-7]。近年来, 对于食品中生物胺的形成机制及检测方法已有相对成熟的研究, 但针对发酵食品加工与贮藏过程中生物胺的控制策略研究较少。因此本文在简单介绍发酵食品生物胺形成途径的基础上, 重点针对发酵食品在加工和贮藏过程中生物胺的有效控制策略展开综述, 为进一步降低发酵食品中生物胺提供解决方法和参考。

1 生物胺概述

根据生物胺的结构可将其划分为 4 类: 腐胺(putrescine)、尸胺(cadaverin)、精胺(spermine)、亚精胺(spermidine)等脂肪族胺; 酪胺(tyramine)、苯乙胺(phenylethylamine)等芳香族胺; 组胺(histamine)、色胺

(tryptamine)等杂环胺及甲胺(methylamine)、吡咯烷酮(pyrrolidinone)等挥发性胺^[8]。按组成成分又可以将生物胺分为一元胺、二元胺和多胺, 一元胺包括组胺、酪胺、色胺、苯乙胺; 二元胺包括腐胺、尸胺; 多胺包括精胺和亚精胺^[9]。

生物胺在人体内含量极低, 一般不会引起不良反应。但机体摄入过量生物胺可导致头晕头疼、血压异常、呼吸紊乱等严重反应, 组胺是毒性最大的生物胺^[10]。有研究证明, 食用浓度超过 100 mg/kg 高组胺食物可能会导致组胺中毒, 出现炎症反应、血压紊乱、头晕头疼等症状, 并伴随典型的过敏反应、荨麻疹等, 严重者甚至危及生命^[11]; 酪胺已被证明是一种生物血管活性胺, 过量的酪胺可引发高血压、帕金森等症状^[12]; 二元胺均能和亚硝酸发生反应生成可引发癌症的亚硝胺化合物^[13-14]。腐胺与致病性革兰氏阴/阴性菌的毒性有关^[15]。此外, 有研究表明生物胺之间有协同增加作用, 如二元胺和多胺的存在会抑制单胺的代谢, 从而增强毒性, 引发机体中毒^[15]。常见生物胺的产生及生理功能、毒性作用见表 1。

2 发酵食品中生物胺的形成途径

除食品原料自身存在的少量生物胺之外, 发酵食品中的生物胺主要是在加工和贮藏过程中产生的。生物胺的形成机理主要有两条途径(图 1): 一是由醛和酮类化合物在微生物的作用下通过氨基化和转胺作用形成, 二是由其本身存在的内源酶或者产胺菌在适宜的环境中产生氨基酸脱羧酶催化游离氨基酸发生脱羧作用形成^[21]。发酵食品中含有大量可供产胺菌利用的游离氨基酸, 大部分发酵食品中的生物胺主要通过第二种途径形成^[22]。

表 1 常见生物胺的产生及作用
Table 1 Production and action of common biogenic amines

生物胺	前体物质	产胺微生物 ^[16]	生理功能 ^[17]	毒性作用
组胺	组氨酸	摩根式菌属、克雷伯氏菌属、乳酸杆菌属、微球菌属	神经递质, 参与局部免疫反应、炎症反应, 调节肠道生理功能, 并参与炎症反应	头疼、消化障碍及血压异常, 甚至会引起神经性毒性 ^[11]
酪胺	酪氨酸	肠杆菌属、乳酸杆菌属、肉食杆菌属、乳球菌属	抗氧化作用, 增加心率、血压和血糖浓度	引起偏头痛、恶心呕吐、高血压、帕金森 ^[12]
色胺	色氨酸	大肠杆菌属	调节血压、收缩血管	引起哮喘、血压升高和消化系统失调 ^[13]
苯乙胺	苯丙氨酸	乳杆菌属、木糖葡萄球菌属	增加血压、调节去甲肾上腺素水平	引起高血压和偏头痛 ^[18]
腐胺	鸟氨酸	假单胞菌属、埃希氏菌属、希瓦氏菌属、短乳杆菌属、志贺氏菌属	基因表达调控、细胞分化和增殖	增强组胺和酪胺的毒性效应 ^[19]
尸胺	赖氨酸	埃希氏菌属、李斯特菌属、志贺氏菌属、葡萄球菌属、链球菌属、弧菌属	基因表达调控、细胞分化和增殖	增强组胺和酪胺的毒性效应 ^[19]
精胺、亚精胺	精氨酸	乳酸片球菌属、金黄色葡萄球菌属	促进 DNA、RNA 和蛋白质的合成, 加速生物体的生长发育	形成亚硝胺等致癌物质 ^[20]

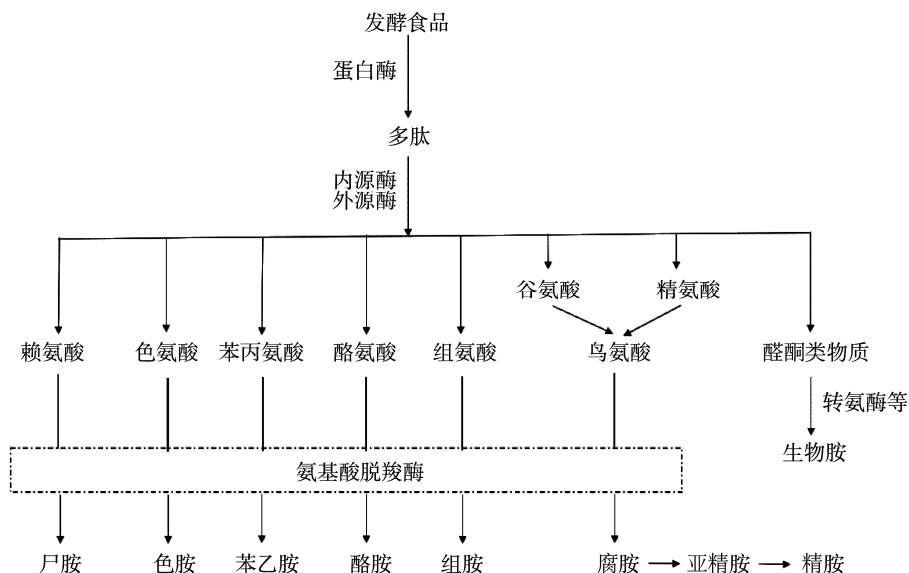


图 1 发酵食品中生物胺的代谢途径

Fig.1 Metabolic pathway of biogenic amines in fermented foods

3 发酵食品加工过程中生物胺的控制策略

我国发酵食品生产历史悠久、产品种类繁多,如食醋、泡菜、酸奶等。在发酵食品中,原料成分、发酵剂选择和工艺条件(温度、盐度、pH)对于生物胺的控制都至关重要。

3.1 原料的选择与控制

生物胺是食品细菌性腐败的重要化学标志物,可以作为衡量食品新鲜程度的潜在评价指标。生物胺含量不仅在不同食品品种之间差异较大,其不同新鲜度的同种食品之间也有明显差异。首先,发酵食品原料可为形成生物胺提供适宜的底物和环境条件,食品原料的新鲜度对发酵制品生产加工过程中生物胺的含量变化有显著影响。徐晔等^[23]研究牛肉宰后 0~4℃条件下贮藏不同时间(0、12、24、36 h)对发酵香肠中生物胺含量的影响,发现未经贮藏牛肉制作的香肠中酪胺、组胺、尸胺、腐胺含量均低于贮藏 36 h 牛肉制作的香肠。因此,通过缩短原料肉贮藏时间可以有效减少发酵香肠中微生物数量,降低菌群多样性和丰富度,减少生物胺的积累量。其次,生物胺主要是由微生物降解食品中的蛋白质产生,食品原料中蛋白质含量直接影响其发酵制品中生物胺的产生。例如原料肉中蛋白质丰富、水分活度高,可为埃希氏菌属、假单胞菌属、沙门氏菌属和乳酸菌属等具有氨基酸脱羧酶活性微生物的生长繁殖提供优越条件,促进蛋白质降解,形成生物胺。因此,原料肉的蛋白质含量是影响肉制品中生物胺含量的重要因素^[24-25]。此外,除蛋白质以外的其他组分也会影响生物胺的产生。原料肉中脂肪比例与肉制品中生物胺含量之间也存在较高的相关性。姜皓等^[26]研究表明随着原料肉中脂肪比例的增

加,培根中总生物胺含量呈降低趋势。原料肉质量一定,脂肪比例越高,蛋白质含量则相对较低,蛋白质分解产生的游离氨基酸越少,生物胺含量越低。发酵食品中的生物胺大部分是由游离氨基酸发生脱羧作用后产生,而糖类经过糖酵解、柠檬酸循环等复杂途径也能形成生物胺的前体物质游离氨基酸^[27]。葡萄酒是以葡萄或葡萄汁为原料酿制发酵而来^[28],不同品种、产地、成熟度的葡萄发酵出的酒中生物胺含量也具有差异性,这与葡萄生长期间的气候条件有关,还与葡萄中果胶含量密切相关^[29-30]。GOMEZ 等^[30]将不同品种的葡萄分别制成葡萄汁及葡萄酒并分析其生物胺组成,发现不同品种葡萄汁及葡萄酒中生物胺的总量和种类均存在差异,研究表明,抗氧化活性越强的葡萄原料,其酿制的葡萄酒中生物胺含量也越高。

综上,在生产过程中的原料选择上,应侧重于选用贮藏时间较短或脂肪含量高、蛋白质含量较低的原料。然而值得注意的是,乳制品中蛋白质水解得到的氨基酸是构成乳制品风味的重要组成部分^[31],减少氨基酸含量可能会影响其风味水平,所以目前乳制品企业很少选用减少氨基酸含量的方法来降低生物胺总量。

3.2 改良发酵菌株

发酵食品中的生物胺主要是由对应游离氨基酸发生脱羧作用而来,除少部分自身存在的内源酶外,大部分都是由具备氨基酸脱羧酶活性的微生物分泌而来^[32],所以改良发酵菌种可以在一定程度上减少发酵食品中的生物胺含量。常见的生物胺产生菌都具有氨基酸脱羧酶的活性,主要包括链球菌属、梭菌属、克雷伯氏菌属、假单胞菌属、沙丁氏菌属等。

3.2.1 无氨基酸脱羧酶活性发酵菌株的使用

在食品发酵过程中, 采用不产氨基酸脱羧酶的发酵菌株进行发酵可有效控制生物胺的产生, 减少生物胺的积累。谢九艳等^[33]从新疆乳制品中分离得到产马乳酒乳杆菌(CICC 6287), 通过对比分析实验组与对照组的氨基酸脱羧酶活性, 发现 CICC 6287 的 4 种脱羧酶活性均为阴性, 可有效减少生物胺产生, 提高乳制品的安全性。除乳制品外, 将发酵豆制品中的芽孢杆菌开发为发酵剂也可有效控制其生物胺含量^[34]。有研究表明, 在发酵大豆分离出的芽孢杆菌中未发现组氨酸和酪氨酸脱羧酶基因的表达, 即该菌株不具有组氨酸、酪氨酸脱羧酶基因, 不产生组胺、酪胺^[35]。因此, 接种无氨基酸脱羧酶活性的优势发酵菌株能有效控制发酵食品中生物胺含量。该方法被认为是目前最有效且对食品风味影响最小的方法, 适用于豆豉、酒曲等需要接种微生物的发酵食品, 但接种的同时也应考虑菌株的用量问题, 针对不同的发酵制品需要筛选适宜的发酵剂, 应通过大量基础实验对菌种和发酵食品进行综合评估。

3.2.2 复合发酵剂对生物胺的消减控制作用

食品发酵过程本身就存在一些产生物胺菌群, 不可避免会产生生物胺。发酵剂与发酵食品中生物胺的形成有重要关联。有研究证明, 使用产细菌素的乳酸乳球菌可以限制嗜热链球菌和粪肠球菌产生生物胺^[36]。VALLE 等^[37]研究了组氨酸脱羧酶阳性的乳酸菌数量与使用和不使用乳酸菌发酵剂的奶酪中生物胺(尤其是组胺)含量之间的关系, 结果表明具有脱羧酶阳性的乳酸菌菌株和组胺的百分比之间存在直接关系, 组胺的百分比又与酪胺、苯乙胺的浓度之和存在直接关系。有报道将不产生物胺的植物乳杆菌和具有降胺功能的木糖葡萄球菌以 1:2 的比例接种于黄酒进行发酵, 结果表明, 发酵体系中的生物胺含量显著下降, 混合菌种通过脱羧和转氨作用发挥了降低生物胺积累的协同作用^[38]。蔡永敏等^[39]将筛选出的最佳复配比例的植物乳杆菌与木糖葡萄球菌复合发酵剂接种到发酵香肠, 测定香肠中生物胺含量发现, 相较于单一发酵剂和空白对照组, 混合发酵剂可有效降低香肠中苯乙胺和组胺含量, 即混合发酵剂对香肠中生物胺有显著抑制作用。谭李红等^[40]研究戊糖片球菌和木糖葡萄球菌的复合发酵剂对发酵香肠中组胺、酪胺和色胺含量的影响时发现, 木糖葡萄球菌在发酵香肠过程中具有协同降胺能力, 即通过增加戊糖片球菌的菌落总数可达到降低生物胺含量的目的。因此, 就降胺的角度而言, 复合发酵剂相比于单一发酵剂会更有利于生物胺的消减控制。

3.2.3 降解菌的复合使用

发酵食品中某些菌株通过产生氨基酸脱羧酶促进生物胺的积累, 也有菌株通过产生胺氧化酶降解生物胺, 从而抑制生物胺的形成。胺氧化酶是一种能够催化胺类氧化脱氨的特殊蛋白质, 其主要作用于单胺、二胺与多胺的伯

胺基和仲胺基, 将其进一步氧化还原生成相应的醛、氨和过氧化氢^[41]。因此, 除了控制发酵食品中生物胺来源这一方法外, 还可以采用酶降解法将已产生的生物胺进行分解。赵一睿等^[42]从蛭虾酱中分离出盐反硝化枝芽孢杆菌, 经实验发现其脱羧酶活性呈阴性且胺氧化酶呈阳性, 即不产生物胺且具有降解生物胺的能力。将该菌接种于其他发酵食品中, 仍有很高的降解生物胺的能力, 故可作为控制食品中生物胺形成的潜在候选菌株。卢士玲^[43]通过筛选鉴定获得了产生物胺氧化酶的 3 株菌, 将其两两混合用于传统中式香肠的生产中, 发现木糖葡萄球菌与两株植物乳杆菌混合培养时, 其氧化减少生物胺的能力优于单独添加植物乳杆菌。众多研究表明从食物中分离的植物乳杆菌、戊糖片球菌、乳酸片球菌等菌株可以在体外降解酪胺和组胺, 为生物胺酶降解法的应用提供理论依据^[44]。例如, NIU 等^[45]从黄酒发酵液中分离得到植物乳杆菌 CAU 3823, 并从该菌株鉴定出 9 种胺氧化酶, 纯化后的胺氧化酶混合物在 pH 4.0、33°C 的条件下孵育 2 h 后可降解混合胺溶液(50 mg/L)中超过 40% 的生物胺。刘玉晗等^[46]筛选出了 4 株具有产胺氧化酶能力的菌株, 其中以乳酸片球菌效果最好, 该菌不仅对各种生物胺有降解能力, 而且对金色葡萄球菌等致病菌有良好抑制作用。吴燕燕等^[47]从咸鱼中筛选出 3 株具有降解生物胺效果的菌株, 反接到咸鱼产品中仍可显著降低生物胺的含量。ZAMAN 等^[48]将从鱼露中分离得到的具有胺氧化酶活性的肉糖葡萄球菌 FS19 和淀粉液化芽孢杆菌 FS05 作为发酵剂加到鱼露中, 检测其生物胺积累量发现组胺浓度分别降低 27.7% 和 15.4%, 并同步减少了其他生物胺积累。除了鱼类以外, 奶酪产品同样会引起组胺中毒, 其原因在于脱羧酶阳性微生物中, 肠杆菌科的许多菌株和某些乳杆菌、小球菌和肠球菌在奶酪中特别活跃, 选择原生胺阴性和胺氧化乳酸菌是减少传统干酪生物胺的积累最有效的方法之一, 且能保证其感官品质^[49]。

除了直接降解生物胺, 还可通过改良发酵菌群结构的方式来降低食品中生物胺的含量。刘彩霞等^[50]基于对浸米水微生物群落结构的解析, 将产酸能力强且能够降解生物胺的植物乳杆菌 14-2-1 接种于浸米起始阶段, 使其主导浸米水中的微生物区系, 从而降低浸米过程生物胺的积累。通过影响微生物菌群间相互作用来达到抑制产胺菌生长和生物胺形成的目的。

基于以上研究和应用结果可知, 利用微生物降解发酵食品中生物胺主要依赖微生物表达的胺氧化酶, 通过筛选获得具有单胺氧化酶活性且安全可靠的微生物菌株, 能有效减少食品中生物胺的含量。但是将该方法应用于发酵酒类的效果并不显著, 胺氧化酶活性在乙醇与生物胺的协同作用下受到抑制。有研究证明 12% 的乙醇会抑制 91% 的胺氧化酶活性, 从而导致生物胺含量增加, 危险系数升高^[51]。此外, 有研究发现胺脱氢酶也可以降解生物胺^[52]。

TAPINGKAE 等^[53]发现了只对组胺起作用的由极端嗜盐古菌分泌的组胺脱氢酶,但有研究表明胺脱氢酶为碱性氧化酶,在偏酸性的发酵食品中不能有效发挥胺降解作用^[54],且胺脱氢酶的活性易受到氨基脲和氨基胍等羰基试剂的强烈抑制^[55],所以并不适用于发酵食品中生物胺的降解。

3.3 发酵条件的改善

发酵食品加工过程中生物胺的形成受到各种因素的影响,例如发酵时间和温度、pH、盐浓度、添加剂等。而且发酵食品的加工工艺一般包括多道工序,对其生产过程中生物胺含量的变化进行跟踪分析,有助于找到关键危害点,采取针对性的改进措施。

3.3.1 优化工艺条件

腐败微生物的作用需要一定的发酵时间、温度、pH 和盐浓度。温度影响生物胺的生成,其生成量通常会随着温度的升高而增加,反之,低温环境可以抑制微生物的生长和酶活性,因此可使生物胺产量降低。一般情况下,在最适温度 20~37°C 条件下有利于生物胺的产生和积累,在极低温度(低于 5°C)或极高温度(高于 40°C)条件下,生物胺的产生与积累也会明显降低^[56]。钱茜茜等^[57]从腌制海鲈鱼中分离出的假单胞菌、弧菌及葡萄球菌等 14 株产胺菌在 30°C 时生长迅速,在 4°C 时生长受到抑制,生物胺生成量明显下降。发酵时间会影响发酵食品中产胺菌和某些腐败菌的生长及其对发酵食品中营养物质的分解利用。LIU 等^[58]研究发现发酵臭豆腐中含有腐胺、尸胺、亚精胺、精胺和胍丁胺,其中腐胺和尸胺的产量与发酵时间呈显著正相关($P < 0.05$),且延长发酵时间后总生物胺含量也会增加,发酵时间应小于 48 h,建议的最佳发酵时间为 12~18 h。此外,影响氨基酸脱羧酶活性的关键因素是 pH^[8]。张黎明等^[59]研究发现菌株肠杆菌 YC-1 的腐胺产量在 pH 4.5 时高于 pH 5.5 和 6.5 两组,菌株嗜盐单胞菌 BY-17 在 pH 4.5 和 5.5 时组胺产量均高于 pH 6.5。SILVA 等^[60]发现降低 pH 是导致发酵液中组胺和酪胺含量增加的重要原因。大部分氨基酸脱羧酶最适 pH 是酸性的,即在酸性或者微酸性条件下产胺菌分泌氨基酸脱羧酶^[61]。pH 的影响主要体现在两个方面:一方面,提高 pH 会抑制微生物的生长;另一方面,较低的 pH 环境会引发细菌对于酸度环境的防御机制,在缺少营养物质和低酸条件下,微生物通过代谢氨基酸维持其生长活性,从而形成碱性的生物胺^[62],两方面的影响共同决定发酵食品中生物胺的含量。最后,盐浓度影响生物胺的形成主要是因为高浓度盐会使发酵体系形成高渗透压,抑制微生物的生长并降低产胺菌的氨基酸脱羧酶活性,从而降低发酵食品中生物胺的积累。ROSEIRO 等^[63]研究表明,干腌金枪鱼肌肉产品中生物胺含量随着盐浓度的增加而减少。KIM 等^[64]发现在制备发酵豆瓣酱的过程中,低盐发酵条件比高盐发酵条件下会产生更多生物胺。这是由于酱醪高盐环境下具有更高的渗透压,微生物的生长繁殖

受到了抑制。值得注意的是,盐浓度对微生物菌群的生存能力有显著影响^[65]。

综上,可以通过调整发酵工艺来达到抑制生物胺产生的目的。如通过利用烟熏工艺可以达到降低发酵火腿中生物胺的目的^[66]。在酒的发酵过程中,可以通过控制发酵 pH、温度及有机酸含量等条件来抑制乳酸菌中氨基酸脱羧酶的活性;SANTOS 等^[67]研究腌制金枪鱼中微生物状况与生物胺之间的关系,结果表明同种类的鱼肉在不同盐浓度条件下微生物产生生物胺的总量和比例是不同的。ALIAKBARLU 等^[68]用响应曲面法研究了成熟时间(25~75 d)、成熟温度(4~14°C)和盐水浓度(10%~13%)等工艺条件对 12 种伊朗白盐牛奶酪中生物胺含量的影响,发现在较短成熟期内,生物胺含量随盐水浓度的增加而降低,而在较长成熟期内,生物胺含量则相反。由此可见,成熟时间、成熟温度和盐水浓度 3 个处理因素对生物胺产量的影响差异很大,其中一个因素的影响完全取决于另一个因素的水平。目前,许多研究对工艺条件的分离效应进行了探究,但对工艺因素的交互作用研究较少,要有效控制生物胺的生成,必须充分考虑工艺条件的交互作用。

3.3.2 添加剂的使用

在发酵食品加工过程中添加适量食品添加剂可以有效抑制生物胺的形成,其中包括天然物质及其提取物(大蒜、红辣椒、葱、茶多酚、姜辣素、壳聚糖、甘氨酸等)。例如,添加甘氨酸可以明显地减少发酵凤尾鱼中腐胺、尸胺、组胺、酪胺和精胺的产生,5%和 10%两个浓度的甘氨酸均表现出良好的抑制效果,且将蔗糖、葡萄糖、D-山梨醇、乳酸、柠檬酸和山梨酸与甘氨酸相比,甘氨酸的效果更优越^[69]。此外,加入乳酸链球菌肽和亚硝酸盐对生物胺的形成也有一定的抑制作用,研究发现加入亚硝酸盐可以降低土耳其干发酵香肠中色胺、2-苯乙胺、腐胺、尸胺、酪胺和组胺含量,乳酸链球菌肽可以降低色胺含量,亚硝酸盐和乳酸链球菌肽形成协同作用可以显著降低腐胺含量^[70]。改善产品配方,如优化有机酸环境及添加乳酸链球菌肽等天然防腐剂也可提升食品本身的防腐能力。JIA 等^[71]研究香料对发酵羊肉中生物胺的抑制作用,结果表明决明子和茴香的效果最佳,抑制率分别达到了 27.5%和 24.6%。刘静芳等^[72]通过用二氧化硫保鲜剂预处理葡萄酒来降低葡萄酒中的生物胺,发现低温条件下添加二氧化硫处理的葡萄酒中生物胺含量显著减少。在发酵果酒过程中通过添加亚硫酸盐及控制相关生物胺前体物质可以降低生物胺的积累^[73]。BARGOSSO 等^[74]发现添加 15%的盐使酪氨酸脱羧酶活性显著降低。在发酵香肠中,增加盐浓度会降低肠球菌产生酪胺和 2-苯乙胺的浓度。盐发挥了降低脱羧微生物代谢活性的作用,增加盐浓度有利于减少食物中生物胺的积累,且相比于革兰氏阳性菌,增加盐浓度对革兰氏阴性菌的抑制作用更强。但添加剂的使用也有一定的局

限, 其会对产品的风味品质产生不同程度影响。

4 发酵食品贮藏过程中生物胺的控制策略

食品在贮藏过程中容易受到微生物的作用而腐败变质, 产生过量的生物胺。尤其是对于部分未经杀菌和未包装的发酵食品而言, 在贮存期间, 由于腐败微生物的脱羧基作用会显著增加其生物胺含量。为了减少此期间生物胺含量的增加, 可以采取以下贮藏方式。

4.1 新包装方式

良好的包装条件有利于抑制贮藏期间腐败微生物的生长, 延长货架期, 采用气调保鲜、真空包装(vacuum packing, VP)、辐照、超高压等传统技术及 γ 射线灭菌处理等高新技术, 可从源头上杀灭腐败微生物。研究发现, 采用气调包装(modified atmosphere packing, MAP)和VP能有效抑制产胺菌活性, 减少生物胺的形成。已有研究通过分析不同包装方式(VP、有氧包装、盐溶液包装)在泡菜贮藏过程中生物胺的产生情况, 证实VP相比于有氧包装和盐溶液包装能更有效地抑制泡菜中组胺、酪胺和腐胺的积累, 且VP和有氧包装在整个储藏过程中阻止了尸胺的产生, 而盐溶液包装则加速了尸胺的产生^[75]。YEW等^[76]以空气为对照探究不同CO₂组成(VP、30% CO₂、60% CO₂、80% CO₂和100% CO₂)气调包装对鲭鱼生物胺形成的影响, 贮存12 d后, 与对照空气相比, VP及4种不同CO₂浓度包装的鱼体内组胺浓度分别降低了6.4%、8.5%、70.3%、78.8%和90.2%。高压处理技术不仅能最小化加工对食品感官和营养的影响, 也能改变食品基质的微生物菌群^[77]。BORGES等^[78]通过使用不同的高压和时间组合处理香肠, 发现乳酸菌活性在344 MPa-1530 s或600 MPa-960 s组合时开始显著下降。但是这种高压处理对凝固酶阴性葡萄球菌的影响很小, 所以该菌对香肠的影响还是不能够被消除。此外, γ 射线处理也可以控制发酵食品中微生物的生长, γ 射线还具有降解某些生物胺的功能, 延长食品的保质期和改善食品的功能特性。如用2.5~25 kGy的 γ 射线处理100 mg/L的9种标准生物胺, 预期能减少或消除食物体系中5%~100%的生物胺, 在 γ 射线剂量不小于5 kGy时, 腐胺、亚精胺和精胺发生显著降解^[79]。而用2、4、6 kGy的 γ 射线处理干酪时, 其总生物胺含量下降, 6 kGy剂量 γ 射线抑制效果最理想^[80]。由此可见, 利用 γ 射线处理减少生物胺是一种可行有效地方法。

4.2 低温贮藏方式

低温贮藏方式能有效抑制腐败微生物的生长繁殖。低温冷冻可以抑制微生物生长、降低蛋白质水解酶和氨基酸脱羧酶活性, 由此减少发酵食品生物胺的产生。例如, 将制作香肠的原料肉在冷冻条件下处理3 d可以减少发酵香肠中肠杆菌生长和尸胺的形成^[81]。SUN等^[82]研究发现, 在

香肠样品储存初期各生物胺含量较低且基本保持不变。随着贮藏时间延长, 在20℃下贮藏的生物胺含量持续增加, 并明显高于4℃下贮藏的生物胺含量。王瑞等^[83]认为, 葡萄酒酿造过程中发酵温度对生物胺含量的影响较小, 而贮藏温度对葡萄酒中生物胺含量有较大影响, 应尽量在低温下贮藏葡萄酒, 以减少生物胺的产生。然而, 低温贮藏并不能绝对控制发酵食品中生物胺的产生, 某些嗜冷细菌也能产生氨基酸脱羧酶, 即使在适当低温下, 脱羧酶也能导致生物胺的生成^[84]。因此在实际生产应用中, 对于不同发酵食品而言, 由于原料成分和性质不同及实际生产过程的差异, 仍需针对性调整控制生物胺含量的策略。

5 结论与展望

在不同的加工方式中, 通过发酵加工的食品中生物胺的含量要明显高于其他加工方式。发酵食品中的生物胺主要是由产胺菌在适宜的条件下分泌的氨基酸脱羧酶作用于游离氨基酸产生的, 因此可以从根源出发, 分别在发酵食品加工和贮藏过程中对其生物胺含量进行控制。一方面, 针对发酵菌株而言, 在食品发酵过程中可采用不产氨基酸脱羧酶或可以降解生物胺的复合发酵菌株, 以有效减少生物胺的积累; 针对发酵条件而言, 可以改变发酵工艺或者使用添加剂; 针对氨基酸前体物而言, 可采用优质的原料来源以达到控制产胺量的目的。另一方面, 在发酵食品贮藏过程中, 通过调整包装方式、优化贮藏条件等来有效抑制微生物生长, 从而在一定程度上减少贮存期间生物胺含量的增加。对于发酵食品而言, 从一系列发酵微生物中筛选出不产胺或可降解生物胺的优势菌株是控制生物胺的有效措施, 然而, 在发酵过程中, 氨基酸脱羧酶的种类和具体作用形式尚不明晰, 有待进一步研究。此外, 不同类型的发酵食品应当针对性地采取对应的控制策略, 例如在葡萄酒中添加二氧化硫、对鱼罐头进行辐照杀菌等都会使得对应食品中生物胺含量显著减少, 因此针对不同类型发酵食品在发酵过程中的变化与生物胺产量的关系也值得进一步研究。在发酵食品中生物胺安全性受到广泛关注的环境下, 我们应该积极开展研究, 规范生产管理, 降低产品中生物胺的含量。这不仅可以保证发酵食品品质, 也为以后我国传统发酵食品走出国门、增强国际市场竞争力提供理论基础。

参考文献

- [1] 陶志华, 刘伟铸, 乔娜, 等. 广东梅香鱼生物胺含量分析研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(8): 137-139.
TAO ZH, LIU WQ, QIAO N, et al. Analysis of biogenic amines content in Guangdong Meixian fish [J]. China Cond, 2021, 46(8): 137-139.
- [2] 田建军, 张开屏, 景智波, 等. 发酵肉制品加工中衍生的非健康因子控制研究进展[J]. 中国食品学报, 2020, 20(1): 275-283.
TIAN JJ, ZHANG KP, JING ZB, et al. Recent progress on control of the unhealthy factors deriving from spontaneously fermented meat products

- processing [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(1): 275–283.
- [3] 张成强. 贮藏过程中太平洋褶柔鱼生物胺及挥发性成分的变化规律[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- ZHANG CQ. Changes of biogenic amines and volatile compounds in North Pacific Squid during storage [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [4] ASLAM H, GREEN J, JACKA FN, *et al.* Fermented foods, the gut and mental health: A mechanistic overview with implications for depression and anxiety [J]. *Nutr Neurosci*, 2018, 23(10100): 1–13.
- [5] SIVAMARUTHI BS, KESIKA P, CHAIYASUT C. Impact of fermented foods on human cognitive function-A review of outcome of clinical trials [J]. *Sci Pharm*, 2018, 86(2): 22.
- [6] 何璇, 马堃, 哈斯, 等. 食品中生物胺形成与抑制的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(18): 294–300.
- HE X, MA K, HA S, *et al.* Research progress on the formation and inhibition of biogenic amines in food [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(18): 294–300.
- [7] 王波, 肖珊, 蔡燕雪, 等. 发酵食品中生物胺的研究现状[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(16): 5614–5619.
- WANG B, XIAO S, CAI YX, *et al.* Research status of biogenic amines from fermented foods [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(16): 5614–5619.
- [8] SANTOS MHS. Biogenic amines: Their importance in foods [J]. *Int J Food Microbiol*, 1996, 29(2–3): 213–231.
- [9] 王光强, 俞剑荣, 胡健, 等. 食品中生物胺的研究进展[J]. *食品科学*, 2016, 37(1): 269–278.
- WANG GQ, YU JS, HU J, *et al.* Progress in research on biogenic amines in foods [J]. *Food Sci*, 2016, 37(1): 269–278.
- [10] RIO BD, REDRUELLO B, LINARES DM, *et al.* The biogenic amines putrescine and cadaverine show *in vitro* cytotoxicity at concentrations that can be found in foods [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 120.
- [11] PROVENSÍ G, PASSANI MB, COSTA A, *et al.* Neuronal histamine and the memory of emotionally salient events [J]. *Brit J Pharmacol*, 2020, 177(3): 557–569.
- [12] WÓJCIK W, ŁUKASIEWICZ M, PUPPEL K. Biogenic amines: Formation, action and toxicity-A review [J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 101(7): 2634–2640.
- [13] GOMES MB, PIRES BAD, FRACALANZZA SAP, *et al.* The risk of biogenic amines in food [J]. *Cien Saude Colet*, 2014, 19(4): 1123–1134.
- [14] PAUDEL S, MEHTANI D, PURI N. Mast cells may differentially regulate growth of lymphoid neoplasms by opposite modulation of histamine receptors [J]. *Front Oncol*, 2019, 9: 1280.
- [15] SHAH P, SWLATLO E. A multifaceted role for polyamines in bacterial pathogens [J]. *Mol Microbiol*, 2008, 68(1): 4–16.
- [16] 张立飞, 孙明浩, 华成黎, 等. 发酵食品中生物胺的形成、检测及其防控策略的研究进展[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1–12. [2022-09-10]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030365
- ZHANG LF, SUN MH, HUA CL, *et al.* Research progress on the formation and detection of biogenic amines in fermented foods and their prevention and control strategies [J/OL]. *Food Ferment Ind*: 1–12. [2022-09-10]. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.030365
- [17] IRENA KC, SASO R, TJASA R, *et al.* Accumulation of agmatine, spermidine, and spermine in sprouts and microgreens of alfalfa, fenugreek, lentil, and daikon radish [J]. *Foods*, 2020, 9(5): 547.
- [18] SHALABY AR. Significance of biogenic amines to food safety and human health [J]. *Food Res Int*, 1996, 29(7): 675–690.
- [19] DABADD S, JACXSENS L, MICLOTTE L, *et al.* Survey of multiple biogenic amines and correlation to microbiological quality and free amino acids in foods [J]. *Food Control*, 2021, 120: 107497.
- [20] MOHAMMED GI, BASHAMMAKH AS, ALSIBAAI AA, *et al.* A critical overview on the chemistry, clean-up and recent advances in analysis of biogenic amines in foodstuffs [J]. *TrAC-Trend Anal Chem*, 2016, 78: 84–94.
- [21] EKICI K, OMER AK. Biogenic amines formation and their importance in fermented foods [J]. *BIO Web Conf*, 2020, 17: 00232.
- [22] 吴曼铃, 时瑞, 胡锦涛, 等. 咸鱼中生物胺的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(19): 374–379.
- WU ML, SHI R, HU JP, *et al.* Research progress on biogenic amines in salted fish [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(19): 374–379.
- [23] 徐晔, 刘诗宇, 王艺伦, 等. 原料肉贮藏时间对牛肉发酵香肠中微生物菌相变化和蛋白质降解的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 184–191.
- XU Y, LIU SY, WANG YL, *et al.* Effect of storage time of raw beef on microbial changes and protein degradation in fermented beef sausages [J]. *Food Sci*, 2021, 42(9): 184–191.
- [24] CHE MX, WANG L, DONG XL, *et al.* Progress in research on formation and control of biogenic amines in meat products [J]. *Meat Res*, 2022, 36(8): 66–70.
- [25] MEHDI T, ANA MH, FRANCISCO JC, *et al.* Quality assessment of fresh meat from several species based on free amino acid and biogenic amine contents during chilled storage [J]. *Foods*, 2018, 7(9): 132.
- [26] 姜皓, 陈援援, 杨璐, 等. 原料肉脂肪比例对培根加工过程中安全性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 40(20): 300–306.
- JIANG H, CHEN YY, YANG L, *et al.* Effect of fat ratio in raw meat on safety indicators during processing of bacon [J]. *Food Sci*, 2020, 40(20): 300–306.
- [27] 陈牧, 刘锐, 翁屹. 三羧酸循环的发现与启示[J]. *医学与哲学*, 2012, 33(1): 71–73.
- CHEN M, LIU R, WENG Y. The discovery and revelation of tricarboxylic acid cycle [J]. *Med Philos*, 2012, 33(1): 71–73.
- [28] UBEDA C, HORNEDO-ORTEGA R, CERESO AB, *et al.* Chemical hazards in grapes and wine, climate change and challenges to face [J]. *Food Chem*, 2020, 314(C): 126222.
- [29] CORNELIS, VAN, LEEUWEN, *et al.* The impact of climate change on viticulture and wine quality [J]. *J Wine Econ*, 2016, 11(1): 150–167.
- [30] GOMEZ HAG, MARQUES MOM, BORGES CV, *et al.* Biogenic amines and the antioxidant capacity of juice and wine from brazilian hybrid grapevines [J]. *Plant Food Hum Nutr*, 2020, 75(2): 258–264.
- [31] NOVELLA-RODRIGUEZ S, VECIANA-NOGUES MT, IZQUIERDO-PULIDO M, *et al.* Distribution of biogenic amines and polyamines in cheese [J]. *J Food Sci*, 2003, 68(3): 750–756.
- [32] EKICI K, OMER AK. Biogenic amines formation and their importance in fermented foods [J]. *BIO Web Conf*, 2020, 17: 00232.
- [33] 谢九艳, 翟磊, 宋振, 等. 菌株 CICC 6287 发酵特性研究及其在辣椒发酵中的应用[J]. *生物技术通报*, 2018, 34(1): 223–229.
- XIE JY, ZHAI L, SONG Z, *et al.* The fermentation characteristics and application in chili fermentation of strain CICC 6287 [J]. *Biotechnol Bull*, 2018, 34(1): 223–229.

- [34] MAH JH, PARK YK, JIN YH, *et al.* Bacterial production and control of biogenic amines in Asian fermented soybean foods [J]. *Foods*, 2019, 8(2): 85.
- [35] EOM JS, SEO BY, CHOI HS. Biogenic amine degradation by *Bacillus* species isolated from traditional fermented soybean food and detection of decarboxylase-related genes [J]. *J Microbiol Biotechnol*, 2015, 25(9): 1519–1527.
- [36] TABANELLI G, MONTANARI C, BARGOSSO E, *et al.* Control of tyramine and histamine accumulation by lactic acid bacteria using bacteriocin forming lactococci [J]. *Int J Food Microbiol*, 2014, 190: 14–23.
- [37] VALLE LJD, GINOVRT M, GORDÚN E, *et al.* Histidine decarboxylase-positive lactic acid bacteria strains and the formation of histamine in ripened cheeses [J]. *J Food Process Pres*, 2018, 42: e13708.
- [38] XIA X, YI L, ZHANG Q, *et al.* Mixed starter culture regulate biogenic amines formation via decarboxylation and transamination during Chinese rice wine fermentation [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(25): 6348–6356.
- [39] 蔡永敏, 黄海英, 胡炜东, 等. 混合发酵剂的筛选及对发酵猪肉香肠加工特性及安全性能的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 138–144.
- CAI YM, HUANG HY, HU WD, *et al.* Screening of mixed starter and its effect on processing characteristics and safety of fermented pork sausage [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(1): 138–144.
- [40] 谭李红, 夏文水, 张春晖. 一种混合发酵剂对干发酵香肠中生物胺含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2005, 26(6): 90–91.
- TAN LH, XIA WS, ZHANG CH. Effect of a mixed fermentor on the biogenic amine content in dry fermented sausages [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2005, 26(6): 90–91.
- [41] 倪秀梅, 杨涛, 方芳. 生物胺降解酶研究进展及其应用[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(11): 4398–4411.
- NI XM, YANG T, FANG F. Biogenic amines-degrading enzymes and their applications: A review [J]. *Microbiol China*, 2021, 48(11): 4398–4411.
- [42] 赵一睿, 桑雪, 毕景然, 等. 蛭虾酱中生物胺降解菌的特性及应用[J]. *大连工业大学学报*, 2022, 41(1): 1–6.
- ZHAO YR, SANG X, BI JR, *et al.* Characteristics research and application of biogenic amine degrading bacteria in grasshopper sub shrimp paste [J]. *J Dalian Polytech Univ*, 2022, 41(1): 1–6.
- [43] 卢士玲. 传统中式香肠中生物胺产生及其控制技术的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- LU SL. Study on biogenic amine production and its control technology in traditional Chinese sausages [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [44] KUNG HF, LEE YC, HUANG YL, *et al.* Degradation of histamine by *Lactobacillus plantarum* isolated from miso products [J]. *J Food Protect*, 2017, 80(10): 1682–1688.
- [45] NIU TJ, LI X, GUO YJ, *et al.* Identification of a lactic acid bacteria to degrade biogenic amines in Chinese rice wine and its enzymatic mechanism [J]. *Foods*, 2019, 8(8): 312–326.
- [46] 刘玉晗, 卢士玲, 陆静, 等. 乳酸菌中生物胺氧化酶菌株的筛选[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(4): 106–113.
- LIU YH, LU SL, LU J, *et al.* Screening of amine oxidase-producing strains from lactic acid bacteria [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2016, 32(4): 106–113.
- [47] 吴燕燕, 钱茜茜, 陈玉峰, 等. 咸鱼中生物胺降解菌的筛选与降解特性研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(18): 173–179.
- WU YY, QIAN XX, CHEN YF, *et al.* Screening and degradation properties of biogenic amines degrading strains in salted fish [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(18): 173–179.
- [48] ZAMAN MZ, BAKAR FA, JINAP S, *et al.* Novel starter cultures to inhibit biogenic amines accumulation during fish sauce fermentation [J]. *Int J Food Microbiol*, 2011, 145(1): 84–91.
- [49] PLUTA-KUBICAA, FILIPCZAK-FIUTAKM, DOMAGALA J, *et al.* Contamination of traditionally smoked cheeses with polycyclic aromatic hydrocarbons and biogenic amines [J]. *Food Control*, 2020, 112(1): 107115.
- [50] 刘彩霞, 刘双平, 徐岳正, 等. 乳酸菌强化技术降低黄酒浸米过程生物胺的积累[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(5): 1–8.
- LIU CX, LIU SP, XU YZ, *et al.* Lactic acid bacteria fortification reduces biogenic amine accumulation during rice maceration in yellow wine [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(5): 1–8.
- [51] GARCIA-RUIZ A, GONZALEZ-ROMPINELLI EM, BARTOLOME B, *et al.* Potential of wine-associated lactic acid bacteria to degrade biogenic amines [J]. *Int J Food Microbiol*, 2011, 148(2): 115–120.
- [52] SIDDIQUI JA, SHOEB SM, TAKAYAMA S, *et al.* Purification and characterization of histamine dehydrogenase from *Nocardioides simplex* IFO 12069 [J]. *Fems Microbiol Lett*, 2000, 189(2): 183–187.
- [53] TAPINGKAE W, TANASUPAWAT S, PARKIN KL, *et al.* Degradation of histamine by extremely halophilic archaea isolated from high salt-fermented fishery products [J]. *Enzyme Microb Technol*, 2010, 46(2): 92–99.
- [54] 张沁芳. 植物乳杆菌组胺分解酶的分离纯化及性质研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2018.
- ZHANG QF. Purification and characterization of an enzyme capable of histamine degradation from *Lactobacillus plantarum* [D]. Yantai: Yantai University, 2018.
- [55] LEE YC, LIN CS, LIU FL, *et al.* Degradation of histamine by *Bacillus polymyxa* isolated from salted fish products [J]. *J Food Drug Anal*, 2015, 23(4): 836–844.
- [56] 肖洪, 丁晓雯, 梁菡峪, 等. 发酵食品中的生物胺及其控制研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(20): 346–350.
- XIAO H, DING XW, LIANG HY, *et al.* Research progress in the biogenic amines and its control measures in fermented food [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(20): 346–350.
- [57] 钱茜茜, 吴燕燕, 魏涯, 等. 海鲈鱼腌制过程中产胺菌的分离筛选与生物学特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 70–75.
- QIAN XX, WU YY, WEI Y, *et al.* Isolation, screening and biological characterization of amine-producing bacteria in the curing process of sea bass [J]. *Food Ferment Ind*, 2016, 42(1): 70–75.
- [58] LIU ZF, WEI YX, ZHANG JJ, *et al.* Changes in biogenic amines during the conventional production of stinky tofu [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2011, 46(4): 687–694.
- [59] 张黎明, 章祎, 赵云松, 等. 腌鱼中产生物胺菌株的筛选、鉴定及其特性研究[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(7): 291–299.
- ZHANG LM, ZHANG W, ZHAO YS, *et al.* Screening, identification and characteristics of biogenic amines producing strains in salted fish [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(7): 291–299.
- [60] SILVA V, COSTA MP, VIEIRA CP, *et al.* Short communication: Biogenic amine formation during fermentation in functional sheep milk yogurts [J].

- J Dairy Sci, 2019, 102(10): 8704–8709.
- [61] MANCA G, RU A, SIDDI G, *et al.* Biogenic amines content in Fiore Sardo cheese in relation to free amino acids and physicochemical characteristics [J]. Ital J Food Saf, 2020, 9(1): 8457.
- [62] LUND P, TRAMONTI A, DE BD. Coping with low pH: Molecular strategies in neutralophilic bacteria [J]. FEMS Microbiol Rev, 2014, 38 (6): 1091–1125.
- [63] ROSEIRO LC, SANTOS C, GONGALVES H, *et al.* Susceptibility of dry-cured tuna to oxidative deterioration and biogenic amines generation: I. Effect of NaCl content, antioxidant type and ageing [J]. Food Chem, 2017, 228(14): 26–34.
- [64] KIM JH, KIM DH, AHN HJ, *et al.* Reduction of the biogenic amine contents in low salt-fermented soybean paste by gamma irradiation [J]. Food Control, 2005, 16(1): 43–49.
- [65] SANTOS C, ROSEIRO C, GONALVES H, *et al.* Susceptibility of dry-cured tuna to oxidation and biogenic amines generation related to microbial status and salting/curing technology [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 115: 108420.
- [66] MARTUSCELLI M, PITTIA P, CASAMASSIMA LM, *et al.* Effect of intensity of smoking treatment on the free amino acids and biogenic amines occurrence in dry cured ham [J]. Food Chem, 2009, 116(4): 955–962.
- [67] SANTOS C, ROSEIRO C, GONCALVES H, *et al.* Susceptibility of dry-cured tuna to oxidation and biogenic amines generation related to microbial status and salting/curing technology [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 115: 108420.
- [68] ALIAKBARLU J, ALIZADEH M, RAZAVI-ROHANI SM, *et al.* Biogenic amines in Iranian white brine cheese: Modelling and optimisation of processing factors [J]. Int J Dairy Technol, 2011, 64(3): 417–424.
- [69] MAH JH, HWANG HJ. Effects of food additives on biogenic amine formation in Myeolchi-jeot, a salted and fermented anchovy (*Engraulis japonicus*) [J]. Food Chem, 2009, 114(1): 168–173.
- [70] KURT S, ZORBA O. Biogenic amine formation in Turkish dry fermented sausage (Sucuk) as affected by nisin and nitrite [J]. J Sci Food Agric, 2010, 90(15): 2669–2674.
- [71] JIA W, ZHANG R, SHI L, *et al.* Effects of spices on the formation of biogenic amines during the fermentation of dry fermented mutton sausage [J]. Food Chem, 2020, 321: 126723.
- [72] 刘静芳, 张博钦, 朱本忠, 等. 二氧化硫保鲜剂预处理对葡萄酒香气和生物胺含量的影响[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 32–39.
LIU JF, ZHANG BQ, ZHU BZ, *et al.* Effect of pretreatment of sulfur dioxide preservative on aroma and biogenic amines contents in wines [J]. China Brew, 2020, 39(4): 32–39.
- [73] GARAI-IBABE G, IRASTORZA A, DUENAS MT, *et al.* Evolution of amino acids and biogenic amines in natural ciders as a function of the year and the manufacture steps [J]. Int J Food Sci Technol, 2013, 48(2): 375–381.
- [74] BARGOSI E, GARDINI F, GATTO V, *et al.* The capability of tyramine production and correlation between phenotypic and genetic characteristics of *Enterococcus faecium* and *Enterococcus faecalis* strains [J]. Front Microbiol, 2015, 6: 1371.
- [75] ZHAO N, LAI HM, HE W, *et al.* Reduction of biogenic amine and nitrite production in low-salt paocai by controlled package during storage: A study comparing vacuum and aerobic package with conventional salt solution package [J]. Food Control, 2021, 123: 107858.
- [76] YEW CC, BAKAR FA, RAHMAN RA, *et al.* Effects of modified atmosphere packaging with various carbon dioxide composition on biogenic amines formation in indian mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) stored at stored at (5±1)°C [J]. Packag Technol Sci, 2014, 27(3): 249–254.
- [77] GEORGET E, SEVENICH R, REINEKE K, *et al.* Inactivation of microorganisms by high isostatic pressure processing in complex matrices: A review [J]. Innov Food Sci Emerg, 2015, 27: 1–14.
- [78] BORGES AF, COZAR A, PATARATA L, *et al.* Effect of high hydrostatic pressure challenge on biogenic amines, microbiota, and sensory profile in traditional poultry-and pork-based semidried fermented sausage [J]. J Food Sci, 2020, 85(4): 1256–1264.
- [79] KIM JH, AHN HJ, JO C, *et al.* Radiolysis of biogenic amines in model system by gamma irradiation [J]. Food Control, 2004, 15(5): 405–408.
- [80] RABIE MA, SILIHA HI, EL-SAYDY SM, *et al.* Effect of gamma-irradiation upon biogenic amine formation in blue cheese during storage [J]. Int Dairy J, 2011, 21(5): 373–376.
- [81] BOVER-CID S, MIGUELEZ-ARRIZADO MJ, MORATALLA LLL, *et al.* Freezing of meat raw materials affects tyramine and diamine accumulation in spontaneously fermented sausages [J]. Meat Sci, 2006, 72(1): 62–68.
- [82] SUN XY, DU B, ZHAO LH, *et al.* The effect of different starter cultures on biogenic amines and quality of fermented mutton sausages stored at 4 and 20°C temperatures [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8(8): 4472–4483.
- [83] 王瑞, 董荣, 乔丹, 等. 葡萄酒酿造过程中不同工艺参数对生物胺含量的影响[J]. 酿酒科技, 2019, 295(1): 32–38.
WANG R, DONG R, QIAO D, *et al.* Effects of different technical parameters on biogenic amine content in wine-brewing process [J]. Liquor-Mak Sci Technol, 2019, 295(1): 32–38.
- [84] DANQUAH AO, BENJAKUL S, SIMPSON BK. Biogenic amines in foods [M]. Oxford: Food Biochem Food Process, 2012.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



邓斯予, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: dengsiyu0822@163.com



隋建新, 教授, 主要研究方向为水产品加工及贮藏工程。

E-mail: suijianxin@ouc.edu.cn