

兰沁洁, 裴慧洁, 邓霖, 等. 发酵肉制品中酪胺形成途径与控制方法的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 380–388. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040241

LAN Qinjie, PEI Huijie, DENG Lin, et al. Research Progress of Tyramine Formation and Control Methods in Fermented Meat Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 380–388. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040241

· 专题综述 ·

发酵肉制品中酪胺形成途径与控制方法的研究进展

兰沁洁, 裴慧洁, 邓霖, 张月, 杨腊梅, 何维, 马怡煊, 李金海, 杨勇*
(四川农业大学食品学院, 四川雅安 625014)

摘要: 发酵肉制品是指在自然或人工控制条件下, 经微生物或酶的作用, 发生一系列变化, 形成的具有特殊风味、色泽、质地和较长保存期的肉制品。发酵肉制品深受消费者的喜爱, 但是其富含蛋白质, 有极大的可能出现高含量的生物胺。其中以组胺和酪胺的毒性最强, 食用富含酪胺的食物会引起头痛、高血压等不良反应。因此控制发酵肉制品中的酪胺含量是极其有必要的。本文对发酵肉制品中酪胺的形成途径、控制方法及作用效果进行了综述。其中, 主要形成途径是酪氨酸经脱羧酶作用脱羧, 此外存在着与脂质氧化产物有关的化学途径, 而较为有效的控制方法是添加辅料和接种发酵剂。本文以期降低发酵肉制品中的酪胺含量, 提高发酵肉制品的安全性提供理论支持。

关键词: 发酵肉制品, 酪胺, 来源, 形成途径, 控制方法

中图分类号: TS251.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)06-0380-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040241

本文网刊:



Research Progress of Tyramine Formation and Control Methods in Fermented Meat Products

LAN Qinjie, PEI Huijie, DENG Lin, ZHANG Yue, YANG Lamei, HE Wei, MA Yixuan,
LI Jinhai, YANG Yong*

(College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: Fermented meat products is the meat products with special flavor, color, texture and longer shelf life formed by a series of changes under natural or artificially controlled conditions by the action of microorganisms or enzymes. Fermented meat products is popular with consumers, but they are rich in protein and have a great potential for high levels of biogenic amines. Among them, histamine and tyramine are the most toxic. Consumption of tyramine-rich foods might cause headache, hypertension and other adverse reactions. Therefore, it is extremely necessary to control the tyramine content in fermented meat products. In this paper, the formation pathways, control methods and effects of tyramine in fermented meat products are reviewed. Among them, the main formation pathway is the decarboxylation of tyrosine by the action of decarboxylase, in addition to the existence of chemical pathways related to lipid oxidation products, while the more effective control methods are the addition of auxiliaries and the inoculation of fermentation agents. This paper aims to provide a theoretical support for reducing the tyramine content in fermented meat products and improving the safety of fermented meat products.

Key words: fermented meat products; tyramine; source; path of formation; method of control

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32272435); 四川省巴中市市校合作项目 (2122239009)。

作者简介: 兰沁洁 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: 839932549@qq.com。

* 通信作者: 杨勇 (1969-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉品加工与质量控制, E-mail: yangyong676@163.com。

发酵肉制品是指在自然或人工控制的条件下, 通过微生物或酶等作用进行一系列生物化学及物理变化而形成的有特殊风味、颜色及口感并保存期较长的肉制品。传统的发酵肉制品主要包括香肠、腊肉、火腿和酸肉等。发酵所使用的原料肉包括猪肉、牛肉以及羊肉等。发酵肉制品因其营养丰富、肉质鲜美、风味独特, 深受广大消费者的喜爱。然而, 由于发酵肉制品富含蛋白质, 蛋白质易在微生物或酶的作用下分解生成游离氨基酸, 再经脱羧可生成生物胺, 所以发酵肉制品中有极大的可能出现高含量的生物胺。

生物胺是一类低分子量的含氮化合物, 化学结构中含有一个或多个氨基(NH₂), 在生物体内具有生物活性。其中, 以组胺和酪胺最为常见, 经过进一步的研究发现, 在体外人体肠上皮模型中, 酪胺比组胺具有更强、更快的细胞毒性作用^[1]。适量的酪胺可促进人体正常生理活动, 而过量摄入会产生不良反应。因此, 对于发酵肉制品中酪胺含量、形成以及控制措施的研究是有必要的。

本文对发酵肉制品中的酪胺含量、不同国家组织对酪胺的限量、酪胺的形成途径及控制技术进行了综述, 对于采用更高效的方法降低发酵肉制品的酪胺含量, 提高发酵肉制品的安全性具有重要意义。

1 发酵肉制品中酪胺的概述及含量

酪胺是生物胺的其中一种, 属于芳香族生物胺, 化学式为 C₈H₁₁NO, 别名 4-羟基苯乙胺。酪胺主要是以酪氨酸为前体物质, 经酪氨酸脱羧酶的脱羧作用产生的。食用富含酪胺的食物会引起人体毒性反应, 如偏头痛、高血压、恶心、呕吐、神经系统疾病和呼吸系统疾病, 这些统称为“奶酪反应”^[2]。酪胺进入去甲肾上腺素能神经后, 会导致去甲肾上腺素的释放, 从而导致头痛、呼吸加快和血压升高, 甚至会引发中风、心脏病发作或休克症状, 健康个体口服 450 mg 酪胺可使收缩压升高 30 mm 汞柱, 酪胺还可能通过激活肾上腺素能受体产生拟交感神经作用。此外, 有研究通过血脑屏障渗透模型发现酪胺可能在餐后到达中枢神经系统^[3]。也有研究证明酪胺代谢过程会在大鼠体内产生过氧化氢, 从而破坏线粒体, 过氧化氢的产生已被证明有助于人类帕金森病的发展^[3]。有学者创建了肠上皮体外模型, 研究了酪胺对肠细胞的作用, 研究结果表明酪胺能够导致细胞坏死, 并且在酪胺浓度低于 219.49 mg/kg, 组胺浓度低于 1445 mg/kg 时, 两者之间存在协同相互作用^[1]。

目前, 国际上对发酵肉制品中酪胺含量的限制并无统一的标准。美国食品药品监督管理局规定了水产品中酪胺最高限量为 100 mg/kg^[4]。有报道称食品中高水平(100~800 mg/kg)的酪胺是有毒的^[5], 也有研究表明 10~80 mg 的酪胺可引起毒性肿胀, 超过 100 mg 会导致偏头痛^[6]。可见, 应该重视酪胺的潜在毒性和发酵肉制品中的酪胺含量, 特别是在大量

摄入发酵肉制品时。此外, 酒精的摄入会增加酪胺的吸收, 从而增强其血管加压作用; 组胺的无毒浓度(低于 EFSA 建立的安全阈值)以及其他生物胺的存在, 都可以在发酵肉制品中通常达到的浓度下增强酪胺的毒性; 人们本身的遗传缺陷, 胃肠道疾病, 单或二胺氧化酶抑制剂药物的摄入, 或者其他增效因子, 可能会导致人体面临更大的风险^[1,7]。

然而, 根据文献报道, 可以发现, 无论是国内还是国外, 都存在着发酵肉制品中酪胺含量偏高的现象, 如表 1 所示。因此, 尽可能地防止发酵肉制品中的酪胺的积累是非常有必要的。

表 1 不同种类和来源的发酵肉制品的酪胺含量
Table 1 Tyramine content in fermented meat products of different types and sources

样品名称	样品来源	酪胺含量(mg/kg)	文献来源
自然发酵牦牛肉香肠	中国	277.26±12.93	[8]
发酵猪肉香肠	中国	176.93±163.80	[9]
发酵羊肉香肠	中国	229.88±5.64	[10]
Sremski kulen(干发酵香肠)	塞尔维亚	115.80±15.4	[11]
萨拉米香肠	瑞士	785.22	[12]
熏马肉香肠	中国	155.00±2.00	[13]
干发酵香肠	希腊	164.95±98.08	[14]
发酵香肠	韩国	444.67	[15]
萨拉米香肠	意大利	191.24±7.59	[16]
'Nduja(辣味猪肉香肠)	意大利	132.55±42.35	[17]
干腌火腿	意大利	274	[18]
Nham(发酵猪肉产品)	泰国	384.99±20.68	[19]
Pekasam(发酵鱼肉产品)	马来西亚	369.40	[20]

2 发酵肉制品中酪胺的形成途径

发酵肉制品中高浓度的蛋白质在发酵、贮藏等过程中经蛋白酶的作用降解成为游离氨基酸, 在脱羧酶阳性菌存在的情况下, 这些游离氨基酸能够在氨基酸脱羧酶的作用下生成生物胺。发酵肉制品中的酪胺主要就是酪氨酸的脱羧形成的。一般来说, 发酵肉制品中的酪胺是在几个前提条件的存在下产生的^[21]: 一是游离酪氨酸的可用性, 它是形成酪胺的前体物质; 二是能分泌酪氨酸脱羧酶的微生物的存在; 三是允许这些微生物生长的环境条件; 四是保证酪氨酸脱羧酶作用活性的环境条件。酪氨酸的脱羧作用离不开两部分, 一是酪氨酸脱羧酶(Tyramine decarboxylase, TDC), 这是一种磷酸吡哆醛依赖性脱羧酶, 在其作用下, 游离的酪氨酸能够被脱羧形成酪胺, 导致细胞质碱化, 该途径可能在细胞质 pH 稳态和对酸胁迫的抗性中起作用(图 1); 二是酪氨酸转运蛋白, 用

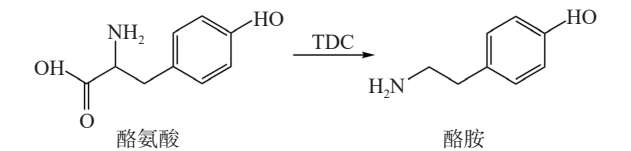


图 1 酪胺形成的主要原理
Fig.1 Main principle of tyramine formation

于将酪氨酸底物转运到细胞中,并从细胞质中除去(分泌)脱羧产物酪胺,能够非常有效地催化酪氨酸与酪胺之间的交换^[22-23]。

另外,有研究表明,生物胺的产生在某种程度上与脂质氧化过程有关。在脂质氧化产物的存在下,氨基酸可以在食品系统中化学脱羧,但是还需要进一步的研究来确定具体的化学途径^[24]。Rosa等^[17]认为氨基酸可以在活性羰基化合物存在的情况下脱羧,例如脂质氧化过程中的那些化合物。其研究结果表明,脂类降解得越多,通过与酶途径互补的化学途径形成的生物胺就越多,包括酪胺。同样地,Liu等^[25]的研究结果也显示,猪背膘的氧化程度越高,四川香肠中蛋白质降解程度越强,酪胺的积累量越多。这表明在肉制品中,脂质氧化产物能够通过某种化学途径促进酪胺的生成,但是具体原理还有待探究。目前而言,这并不是发酵肉制品中酪胺形成的主要方式。

3 发酵肉制品中酪胺的来源

3.1 原辅料中的酪胺

在制作或生产发酵肉制品时,所采用的原料肉和香辛料等辅料中可能本身就含有酪胺。Zhang等^[26]在从当地超市采购的猪肉等样品中都检测到了酪胺。原料肉中的酪胺含量多少很大程度上取决于原料肉的新鲜情况以及原料肉中微生物的生长情况。原料肉中的酪胺主要是通过转移来提升最后成品中酪胺的含量。

发酵肉制品的风味产生除了微生物和酶的作用之外,辅料也占有一定的比重。一般在制作或生产发酵肉制品时,常常会使用到酱油、白酒、米酒等辅料进行调味。而这些辅料本身可能就含有一定量的酪胺。Liu等^[27]研究发现市售酱油中的酪胺含量并不低,测定样品中最高可达 195.04 mg/L;刘慧琳等^[28]对当地企业的白酒进行高效液相色谱法测定后,测定结果表明有少量酪胺检出,样品中含量相对较高的仅为 1.98 mg/L。辅料中的酪胺通常情况下也会在加工过程中转移到产品中来,导致最后发酵肉制品成品中酪胺含量的升高,不过辅料使用量较小,所以其影响也较小。

3.2 发酵过程中产生的酪胺

发酵过程中酪胺的产生主要是产胺微生物的作用。如图2所示,前体酪氨酸通过反向转运蛋白和单转运系统转运到细胞质中之后,被微生物中的酪氨酸脱羧酶脱羧生成酪胺^[23]。产胺微生物除了原辅料中本身存在的之外,还可以在加工前、加工中或加工后通过污染引入。常见的能够产酪胺的微生物主要是一些细菌,包括肠杆菌、肠球菌、明串珠菌、乳球菌和葡萄球菌等^[29],目前有不少学者对这些微生物的产酪胺能力进行了研究。李亚倬等^[30]研究发现,从新疆熏马肠中分离得到的 *Enterococcus hirae* (希氏肠球菌)在含有 0.5% 酪氨酸的 BHI 液体培养基中培养 48 h,最终酪胺生成量达到 189.84 mg/L;Zhan

等^[31]对金华火腿中分离得到的菌株进行研究,结果表明最主要的酪胺生产者是 *Enterococcus faecium* (屎肠球菌),其在含有 1% L-酪氨酸的肉汤中培养 24 h,可产生 134.81 ± 0.69 mg/L 的酪胺。然而,酪胺的产生与微生物种类无关,与微生物菌株差异有很大关系。孙霞等^[32]对从发酵香肠筛选得到一株 *Enterococcus faecium* (屎肠球菌),其不仅不生产酪胺,反而在含有 500 μ g/ml 酪胺的磷酸盐缓冲液中对酪胺有 22.65%的降解率。

发酵过程中产生的酪胺是发酵肉制品中酪胺的主要来源途径,要控制发酵肉制品中酪胺的含量,最重要的就是抑制或阻断这一途径。

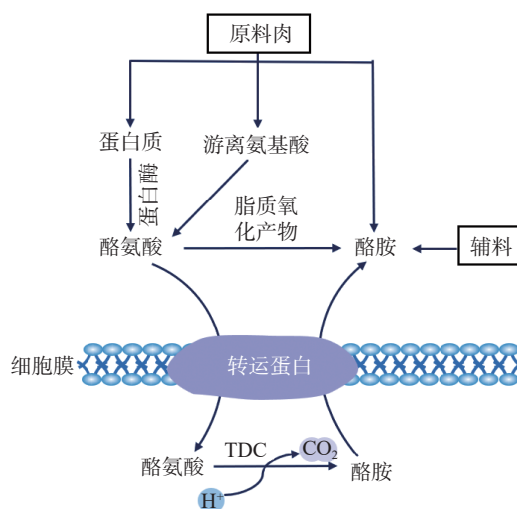


图2 发酵肉制品中酪胺的来源

Fig.2 Sources of tyramine in fermented meat products

4 发酵肉制品中酪胺的控制方法

在肉制品发酵过程中,酪胺的产生主要会受到原辅料质量、生产工艺、环境条件以及贮藏条件等因素影响。因此,目前对于发酵肉制品中酪胺的控制研究主要就是从这些方面入手。从整个工艺流程来看,酪胺的控制方法可以分为以下几类:

4.1 提高原料肉的卫生质量

同等条件下,原料肉越新鲜,污染程度越小会使得最终发酵肉制品中的酪胺含量越低。Bover-cid等^[33]研究表明,新鲜肉制作的香肠酪胺的积累量比不新鲜肉制作的香肠更少;徐晔等^[34]用不同污染程度的原料肉制作发酵牛肉香肠,经测定发现,轻度污染组香肠的酪胺含量仅为重度污染组香肠酪胺含量的四分之一。一方面是因为原料肉卫生质量越好,本身含有的酪胺会越少,减少了酪胺的转移;另一方面,卫生质量越好产胺微生物会越少,发酵过程中产生的酪胺自然会减少。可见,制作发酵肉制品时,保证原料肉的卫生质量是非常重要的。

4.2 发酵前添加辅料

4.2.1 香辛料的乙醇提取物 因香辛料的乙醇提取物含有芳香且刺激性挥发油、有机酸和辛辣成分,在

发酵肉制品发酵前常常加入, 可以通过抑制产酪胺微生物的作用来控制发酵肉制品中酪胺的含量。Sun 等^[35] 和 Jia 等^[36] 分别在制作哈尔滨干香肠和羊肉香肠过程中加入了肉桂、丁香、茴香等香辛料的乙醇提取物, 结果都表明处理组酪胺含量有所降低。此外, 郑欧阳等^[37] 为了得到更有效的效果, 对香辛料的乙醇提取物复配之后加入发酵肉制品中, 结果用香辛料提取物复配处理组(肉桂、丁香和八角)抑制酪胺形成的效果要好于任意两种香料复配处理组。

4.2.2 植物精油 植物精油是从芳香植物中提取出具有挥发性、浓郁香味的脂溶性天然混合物, 大多具有抗菌作用, 研究证实植物精油具有抑制酪胺形成的作用。Carballo 等^[38] 用 *Zataria multiflora* (仅在中东的温暖地区生长和栽培的一种芳香药用植物) 精油处理羊肉后进行发酵制作香肠, 结果表明与未处理的对照组相比, 处理组羊肉香肠酪胺含量得到了降低; Huang 等^[13] 研究发现百里香精油能够抑制传统新疆熏马肉香肠中酪胺的形成, 这与之之前 Bozkurt^[39] 的研究是一致的; 李亚倬等^[40] 研究分析了雪菊精油对熏马肠酪胺含量的影响, 结果显示雪菊精油可以使得熏马肠中的酪胺含量显著降低, 进一步研究表明其可以抑制微生物的生长, 进而抑制微生物中酪氨酸脱羧酶和转运酪胺/酪氨酸蛋白的活性, 减少相关基因表达量, 从而减少酪胺的积累。

4.2.3 酚类化合物 酚类化合物是具有苯酚结构天然化合物的统称, 常见的酚类化合物包括简单酚、酚酸、类黄酮、异黄酮和多酚类。直接将酚类化合物添加进发酵肉制品中能够降低其中的酪胺含量。Wang 等^[41] 用两种植物多酚(绿茶多酚和葡萄籽提取物)对干腌腊肉腌制前的原料肉进行处理, 以探究其中酪胺含量的变化, 结果表明, 这两种植物多酚都能降低干腌腊肉中的酪胺含量; Zhang 等^[42] 经研究发现, 与对照组相比, 加入有玫瑰多酚的自然干燥发酵香肠中的酪胺形成受到了抑制, 且玫瑰多酚的加入量越多, 抑制作用越好, 是因为这些酚类化合物具有抑菌作用, 能抑制产酪胺菌的生长。

4.2.4 其他物质 除了上述三种最常使用的添加物质, 还可以通过提高食盐、糖的用量, 或者添加抗坏血酸、磷酸氢二钾等添加剂降低最终产品中的酪胺含量。Laranjo 等^[43] 研究发现食盐用量的增加可以一定程度上减少发酵肉制品中的酪胺含量, 这是由于高浓度的食盐会使肉制品渗透压升高, 从而抑制微生物的生长, 钠离子浓度的增加还能降低微生物中的酪氨酸脱羧酶活性; 张潇等^[44] 研究结果表明, 随着糖的添加量的提高, 发酵鲐鱼中的酪胺含量呈递减的趋势, 这可能是糖的增加有利于接种的发酵剂(乳酸菌)快速增殖, 使体系的 pH 快速下降从而抑制有害菌的生长; Bozkurt 等^[45] 在土耳其干发酵香肠制作过程中加入了一定比例的亚硝酸盐、抗坏血酸、焦磷酸钾、磷酸氢二钾等添加剂, 研究表明添加剂显著减少了土

耳其干发酵香肠中酪胺的形成, 对于具体原因该学者都未进行深入探究, 可能是因为添加剂的使用改变了发酵肉制品中的微生物构成。然而, 食盐、糖的用量太高容易对人体造成不良影响, 而添加剂的使用也是有限制的, 采用此类方法时, 需要控制添加物的使用量。

总的来说, 辅料的添加都是通过抑制产酪胺菌的生长来抑制发酵肉制品中酪胺的积累。前三类物质对酪胺的降解作用显著, 并且可行, 唯一需要注意的就是用量对发酵肉制品风味、色泽、质构等的影响。在关于抑制发酵肉制品中酪胺形成的研究报道中, 这类方法出现的频率较高, 添加物质的种类及作用效果如表 2 所示, 可见, 大蒜精油、黑胡椒精油、雪菊精油及阿魏酸包含物的添加都可以使得制成的产品中的酪胺含量下降率高达 50% 以上。

表 2 发酵过程中添加的物质及其作用效果
Table 2 Substances added during fermentation and their effects

添加的物质	发酵肉制品	酪胺含量下降情况	文献来源
丁香乙醇提取物	羊肉干发酵香肠	18.70%	[36]
肉桂&丁香&八角 (乙醇提取物)	哈尔滨风干香肠	22.32%	[37]
大蒜精油	新疆熏马肉香肠	61.31%	[46]
肉桂精油	意式香肠	20.94%	[47]
黑胡椒精油	金华火腿	55.66%	[48]
百里香精油	新疆熏马肉香肠	18.25%	[13]
茶多酚	羊肉风干肠	31.19%	[49]
绿茶多酚	干腌腊肉	44.74%	[41]
葡萄籽提取物	干腌腊肉	40.81%	[41]
α -生育酚	干腌腊肉	37.32%	[41]
雪菊精油	熏马肠	65.03%	[40]

4.3 接种合适的发酵菌种发酵

4.3.1 酪氨酸脱羧酶阴性的微生物 酪氨酸脱羧酶阴性的微生物不会产生酪胺, 将其作为发酵肉制品的发酵剂, 在发酵过程中成为优势菌, 通过营养竞争抑制其他微生物生长, 防止酪胺过度积累, 有利于控制酪胺的含量, 此外, 还能增加产品独特的发酵风味。Dong 等^[50] 从哈尔滨干香肠中筛选出了六株酪氨酸脱羧酶阴性的菌株(类植物乳杆菌、弯曲乳杆菌、清酒乳杆菌、植物乳杆菌、副干酪乳杆菌、表皮葡萄球菌), 研究表明这六株菌在均可显著降低酪胺的含量。同样地, Zhang 等^[51] 将一株从传统发酵鱼制品中筛选出来的酪氨酸脱羧酶阴性菌-*Lactobacillus plantarum* ZY-40(植物乳杆菌 ZY-40), 接种到处理好的鲢鱼中进行发酵, 制成鲢鱼香肠, 结果表明, 接种组与未接种组相比酪胺含量更低。可能是因为酪胺脱羧酶阴性菌的接种使原本的微生物构成发生了改变, 减少了产胺微生物的数量或者抑制了活性。

4.3.2 产抑菌代谢物的微生物 产抑菌代谢物的微生物与产酪胺的微生物共同培养时, 除了产生营养竞争之外, 抑菌代谢物还能够抑制产酪胺微生物的生

长。将此类微生物作为发酵剂制作发酵肉制品时,就可以控制酪胺的含量,且不会对产品产生不良影响。如 Sutanate 等^[19] 将一株能产乳酸链球菌素(Nisin)的乳酸菌-*Lactococcus lactis* KTH0-1S(乳酸乳球菌 KTH0-1S)作为发酵剂,制作泰国发酵虾,结果表明与对照组相比,处理组的酪胺含量得到了显著降低,可能是因为 Nisin 能够抑制酪胺产生菌 *Enterococcus faecalis*(粪肠球菌)和 *Streptococcus thermophilus*(嗜热链球菌)的生长^[52]; Zhang 等^[53] 发现能产细菌素的 *Lactobacillus plantarum* LPL-1(植物乳杆菌 LPL-1)作为发酵剂制作低盐发酵香肠时,能够降低最终产品中的酪胺含量,因为细菌素抑制了发酵和成熟过程中腐败菌的生长。

4.3.3 产酪胺降解酶的微生物 常见的能够降解酪胺的酶包括胺氧化酶(Amine Oxidase, AOs)、多铜氧化酶(Multicopper Oxidase, MCO)和芳香胺脱氢酶(Aromatic Amine Dehydrogenase, AADH)^[3,54]。其中, AADH 是碱性氧化酶,最适反应 pH 为 7.5~9.0,偏酸性发酵食品中不具备使 AADH 有效发挥作用的环境条件,因此不适用于发酵肉制品中酪胺的降解^[55]。目前,国内外有不少学者研究发现产酪胺降解酶的微生物能够降低酪胺的含量。谢翀^[56] 将一株能产生 MAO 的 *Lactobacillus plantarum* Fqr(植物乳杆菌 Fqr)作为发酵香肠的发酵剂,结果表明,该发酵香肠中的酪胺含量显著降低; Pištěková 等^[57] 发现能够产生 MCO 的 *Lactobacillus casei* CCDM 198(干酪乳杆菌 CCDM 198)具有较好的降解酪胺的能力。

近年来,制作发酵肉制品多采用外源发酵剂,不仅提升风味还能提升品质,也能够很好地降低酪胺的含量。接种发酵剂也是目前控制发酵肉制品中酪胺含量的热点,如表 3 所示,例举了一些常用的微生物

及作用效果。Li 等^[58] 发现将 *Pediococcus pentosaceus* 30-15(戊糖片球菌 30-15)作为发酵剂发酵罗非鱼香肠时,可以使得香肠中的酪胺含量下降 88.86%。这也充分证明了接种发酵剂在降低酪胺含量的有效性。

4.4 降低发酵过程中的温度

降低发酵过程中的温度也可以达到降低产品最终酪胺含量的目的^[69]。低温不仅能够抑制微生物的生长,还能抑制酪氨酸脱羧酶的活性,此外,还能降低蛋白酶水解活性从而减缓游离酪氨酸的积累。Xu 等^[70] 研究结果表明,低温发酵可以降低发酵鱼制品中的酪胺含量;张潇等^[44] 在不同发酵温度(10、15、20、25 ℃)下制作酸鲈鱼,结果表明,温度对酸鲈鱼中酪胺的形成有重要影响,从 10 ℃ 提高至 25 ℃,酪胺的含量均呈上升趋势;WANG 等^[71] 也发现低温发酵条件下,发酵鱼中的酪胺含量最低,相比于 30 ℃ 下的发酵鱼,15 ℃ 下的发酵鱼中酪胺含量约降为其八分之一。温度的改变虽然能降低酪胺含量,但是也会对产品的风味造成影响,并且效果也是有限的。

4.5 辐照或高压处理

辐照技术作为一种新型的绿色“非热”加工技术,能有效抑制发酵肉制品中的微生物。 γ 射线常用于食品辐照加工技术,通常被认为是一种消毒剂或去污剂,它通过破坏 DNA 的共价键来抑制微生物。 γ 射线辐照能够通过抑制微生物来控制发酵肉制品中酪胺含量的继续增加。Wei 等^[72] 研究了在干腌中国如皋火腿熟化和后熟期进行 γ 射线辐照对其中酪胺的影响,结果表明处理过的火腿中酪胺含量得到了显著降低; Rabie 等^[73] 用不同剂量的 γ 射线辐照(2、4 和 6 kGy)处理贮藏期间的埃及发酵香肠,结果表明与不经辐照的香肠相比,辐照组香肠在贮藏期间酪

表 3 接种的微生物及其作用效果
Table 3 Inoculated microorganism and its effect

微生物	发酵肉制品	酪胺含量下降情况	控制机理	文献来源
葡萄球菌+植物乳杆菌+戊糖片球菌	低酸度川味香肠	36.69%	酪氨酸脱羧酶阴性	[59]
多粘芽孢杆菌D05-1	咸鱼	26.76%	产酪胺降解酶	[60]
植物乳杆菌+木糖葡萄球菌	金华火腿	54.76%	酪氨酸脱羧酶阴性	[61]
乳酸乳球菌KTH0-1S	Kung-som(泰国发酵虾)	30.88%	产抑菌代谢物	[19]
植物乳杆菌CP3+清酒乳杆菌M4	鱼肉香肠	88.00%	产酪胺降解酶	[62]
植物乳杆菌	发酵羊肉香肠	61.70%	酪氨酸脱羧酶阴性	[63]
植物乳杆菌+肉葡萄球菌	发酵羊肉香肠	66.61%	酪氨酸脱羧酶阴性	[63]
木糖葡萄球菌和植物乳杆菌	哈尔滨干香肠	34.87%	酪氨酸脱羧酶阴性	[64]
清酒乳杆菌LS131+腐生葡萄球菌SB12	Galician chorizo(西班牙香肠)	21.27%	酪氨酸脱羧酶阴性	[65]
红曲霉	发酵兔肉香肠	73.02%(4 ℃贮藏53 d)	产抑菌代谢物	[66]
戊糖片球菌30-15	罗非鱼香肠	88.86%	酪氨酸脱羧酶阴性	[58]
植物乳杆菌BL4-8	发酵羊肉干	68.90%	产酪胺降解酶	[67]
表皮葡萄球菌+清酒乳杆菌	哈尔滨干香肠	54.56%	产酪胺降解酶	[68]

胺含量的增幅显著降低,并且试验的辐照剂量越大的组,酪胺含量的降低趋势越大。但是两位学者的研究都表明辐照处理会导致其他生物胺的升高,如亚精胺、尸胺、色胺和苯乙胺。此外,广大消费者对于辐照食品仍然存在疑虑。

高压处理和超高压处理都是通过升高压力来对发酵肉制品进行处理加工,两者都是作用于微生物,使微生物细胞膜和细胞壁损伤等而失去活性。Ucak 等^[74]的研究结果表明高压处理对腌制鲱鱼片中酪胺形成有抑制作用;邱春江等^[75]采用超高压技术对发酵鱼制品进行处理,并且以贮藏过程中酪胺的含量变化为研究对象,结果表明,超高压技术可以有效地抑制有害微生物的生长和控制酪胺的累积,提高产品的安全性。以上都需要相应的大型仪器设备,成本较高,能耗较大,在生产应用中具有一定的局限性。

4.6 改变贮藏条件

低温及短期贮藏有利于控制发酵肉制品中酪胺的积累。Sun 等^[10]的研究结果显示,4℃条件下贮藏的羊肉香肠酪胺含量显著低于20℃条件下贮藏时的羊肉香肠酪胺含量。Rabie 等^[76]将由马肉、牛肉和火鸡肉制成的各种欧洲成熟香肠在4℃条件下储存28d,并对其中的酪胺含量进行实时监测,结果证实了随着贮藏时间的延长,酪胺含量会随之增加。这也与 Carballo 等^[38]的实验结果一致。

此外,采用真空包装也会降低发酵肉制品中的酪胺含量,可能是因为氧气的存在有利于一些产胺微生物的生长。有一些学者采用了不同的包装方式来贮藏发酵肉制品以改变贮藏条件中的氧气占比。Sun 等^[64]分别采用非真空和真空包装哈尔滨干肠,发现在相同发酵条件下,非真空包装的香肠中酪胺含量高于真空包装的香肠。此类方法能够有效控制发酵肉制品成品中的酪胺含量,使其在原有基础上不再增加,但是并不能降低生产过程中已经产生的酪胺含量。

5 结论与展望

发酵肉制品因其独特风味深受大众喜爱,但是易出现高含量的酪胺。适量的酪胺有利于人体正常的生理活动,过量的酪胺对人体有害。因此,严格控制发酵肉制品中的酪胺含量有利于保障发酵肉制品的安全性,推动我国发酵肉制品产业的发展。

因此,了解发酵肉制品中酪胺的形成原理与来源途径非常有必要,这样才能针对性地对影响酪胺形成的各种因素进行调节。从目前的研究来看,按照工艺流程,对发酵肉制品中酪胺含量控制的手段包括:提高原料肉的卫生质量、发酵前添加辅料、接种合适的发酵菌种发酵、降低发酵过程中的温度、辐照或高压处理以及改变贮藏条件。其中发酵前添加香辛料的乙醇提取物、植物精油、酚类化合物等辅料和接种发酵剂发酵相对有效,对发酵肉制品中酪胺的降解率可高达50%以上,并且两种方法都有很大的可行

性。今后的研究可以关注以下几个方面:a.将微生物中降解酪胺的酶提取出来直接加入到发酵肉制品中,但是可能会需要一定的成本;b.进一步研究酪胺降解菌降解酪胺的代谢机制;c.探究酪胺降解菌与产酪胺菌之间在细胞层面的相互作用;d.可以在接种发酵剂的同时,添加香辛料的乙醇提取物、植物精油等辅料,探究其抑制酪胺的效果是否更好。

参考文献

- [1] BEATRIZ D R, BEGOÑA R, DANIEL M L, et al. The dietary biogenic amines tyramine and histamine show synergistic toxicity towards intestinal cells in culture[J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 249–255.
- [2] FINBERG J P, GILLMAN K. Selective inhibitors of monoamine oxidase type B and the "cheese effect"[J]. *Int Rev Neurobiol*, 2011, 100: 169–190.
- [3] ANDERSEN G, MARCINEK P, SULZINGER N, et al. Food sources and biomolecular targets of tyramine[J]. *Nutrition Reviews*, 2019, 77(2): 1–9.
- [4] United States Department of Health and Human Services. Fish and fishery products hazards and controls guidance[EB/OL]. (2011-04-28)[2011-12-20]. <http://www.nal.usda.gov/fsrio/seafood-haccp>.
- [5] BRINK B T, DAMINK C, JOOSTEN H J. Occurrence and formation of biologically active amines in foods[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1990, 11: 73–84.
- [6] MAIJALA R, EEROLA S. Contaminant lactic acid bacteria of dry sausages produce histamine and tyramine[J]. *Meat Science*, 1993, 35(3): 387–395.
- [7] HAZARDS EPOB. Scientific opinion on risk based control of biogenic amine formation in fermented foods[J]. *EFSA Journal*, 2011, 9(10): 2393.
- [8] 李思宁,唐善虎,王柳,等.四川区域自然发酵香肠及人工接种牦牛肉发酵香肠中生物胺含量的研究[J]. *食品科学*, 2016, 37(11): 197–201. [LI S N, TANG S H, WANG L, et al. Study on the concentration of biogenic amines in naturally fermented sausage and artificially inoculated yak sausage in Sichuan province[J]. *Food Science*, 2016, 37(11): 197–201.]
- [9] 孙霞,杨勇,巩洋,等.市售四川香肠中生物胺含量比较分析[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(10): 147–151. [SUN X, YANG Y, GONG Y, et al. Comparative analysis of biogenic amines in Sichuan sausage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(10): 147–151.]
- [10] SUN X Y, DU B, ZHAO L H, 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 Science & Nutrition*, 2020, 8(8): 1–12.
- [11] SUVAJDŽIĆ B, TASIĆ T, TEODOROVIĆ V, et al. Biogenic amine content during the production and ripening of *Sremski kulen*, serbian traditional dry fermented sausage[J]. *Animal Science Journal*, 2020, 91(1): 1–9.
- [12] ANDEREGG J, FISCHER M, DÜRIG J, et al. Detection of biogenic amines and tyramine-producing bacteria in fermented sausages from Switzerland[J]. *Journal of Food Protection*, 2020, 83(9): 1512–1519.
- [13] HUANG L Y, WANG Y, LI R T, et al. Thyme essential oil and sausage diameter effects on biogenic amine formation and microbiological load in smoked horse meat sausage[J]. *Food Bioscience*, 2021, 40(2): 100885.

- [14] PAPAVERGOU E J. Biogenic amine levels in dry fermented sausages produced and sold in Greece[J]. *Procedia Food Science*, 2011, 1: 1126–1131.
- [15] VAN B H, WOO S H, KIM J H, et al. The effects of starter culture types on the technological quality, lipid oxidation and biogenic amines in fermented sausages[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 74: 191–198.
- [16] FAUSTO G, GIULIA T, ROSALBA L, et al. Biogenic amine content and aromatic profile of *Salama dasugo*, a typical cooked fermented sausage produced in emilia romagna region (Italy)[J]. *Food Control*, 2013, 32(2): 638–643.
- [17] ROSA L M, GIANFRANCO S U, BONESI M, et al. Influence of packaging conditions on biogenic amines and fatty acids evolution during 15 months storage of a typical spreadable salami ('Nduja)[J]. *Food Chemistry*, 2016, 213: 115–122.
- [18] VIRGILI R, SACCANI G, GABBA L, et al. Changes of free amino acids and biogenic amines during extended ageing of Italian dry-cured ham[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2006, 40(5): 871–878.
- [19] SUTANATE S, MANEERAT S, THONGRUCK K, et al. Reduction of tyramine accumulation in Thai fermented shrimp (kung-som) by nisin Z-producing *Lactococcus lactis* KTH0-1S as starter culture[J]. *Food Control*, 2018, 90: 249–258.
- [20] SAAID M, SAAD B, NOOR H H, et al. Determination of biogenic amines in selected Malaysian food[J]. *Food Chemistry*, 2008, 113(4): 1356–1362.
- [21] KHATANTUUL P, LEONA B, ANDREA D, et al. The impact of cell-free supernatants of *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* strains on the tyramine formation of *Lactobacillus* and *Lactiplan-tibacillus* strains isolated from cheese and beer[J]. *Food Microbiol-ogy*, 2021, 99: 103813.
- [22] LADERO V, LINARES D M, PÉREZ M, et al. Biogenic amines in dairy products[M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2016: 94–131.
- [23] WOLKEN W A, LUCAS P M, LONAUD-FUNEL A. The mechanism of the tyrosine transporter TyrP supports a proton motive tyrosine decarboxylation pathway in *Lactobacillus brevis*[J]. *Journal of Bacteriology*, 2006, 188(6): 2198–2206.
- [24] RESTUCCIA D, SPIZZIRI U G, BONESL M. Evaluation of fatty acids and biogenic amines profiles in mullet and tuna roe during six months of storage at 4 °C[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 40: 52–60.
- [25] LIU Y X, YANG Y F, LI B B, et al. Effects of lipids with different oxidation levels on protein degradation and biogenic amines formation in Sichuan-style sausages[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 161: 113344.
- [26] ZHANG B, SHENG W, LIU Y, et al. Multiplexed fluorescence immunoassay combined with magnetic separation using up-conversion nanoparticles as multicolor labels for the simultaneous detection of tyramine and histamine in food samples[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 1130: 117–125.
- [27] LIU B, CAO Z N, QIN L H, et al. Investigation of the synthesis of biogenic amines and quality during high-salt liquid-state soy sauce fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 133: 109835.
- [28] 刘慧琳, 赵源, 张瑛, 等. 白酒和黄酒中生物胺的高效液相色谱分析法[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(8): 248–254. [LIU H L, ZHAO Y, ZHANG Y, et al. Determination of biogenic amines in liquor and rice wine by high performance liquid chromatography[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2020, 20(8): 248–254.]
- [29] LADERO V, FERNÁNDEZ M, CALLES-ENRÍQUEZ M, et al. Is the production of the biogenic amines tyramine and putrescine a species-level trait in enterococci?[J]. *Food Microbiology*, 2012, 30(1): 132–138.
- [30] 李亚倬, 黄亚丽, 于红红, 等. 雪菊精油对希氏肠球菌产酪胺及相关基因表达的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 104–111. [LI Y Z, HUANG Y L, YU H H, et al. Effects of chamomile essential oil on tyramine production and related gene expression in *Enterococcus hirsutus*[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 104–111.]
- [31] ZHAN G, PAN D D, ZHOU C Y, et al. Characterizing bacterial strains of spoiled Jinhua ham and evaluating the effect of antimicrobial agents on these isolated bacterial strains[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 136(2): 110352.
- [32] 孙霞. 四川香肠中生物胺降解菌的筛选鉴定及其初步应用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016. [SUN X. Screening and identification of biogenic amine-degrading bacteria in Sichuan sausages and their preliminary application[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016.]
- [33] BOVER-CID S, MIGUELEZ-ARRIZADO M J, MORA-TALLA L L L, et al. Freezing of meat raw materials affects tyramine and diamine accumulation in spontaneously fermented sausages[J]. *Meat Science*, 2005, 72(1): 62–68.
- [34] 徐晔, 杨月, 王艺伦, 等. 原料肉污染程度对发酵牛肉香肠中微生物、生物胺及含氮化合物的影响[J]. *四川农业大学学报*, 2020, 38(4): 484–492. [XU Y, YANG Y, WANG Y L, et al. Effects of contamination degree of raw meat on microorganisms, biogenic amines and nitrogen compounds in fermented beef sausage[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, 38(4): 484–492.]
- [35] SUN Q X, ZHAO X X, CHEN H S, et al. Impact of spice extracts on the formation of biogenic amines and the physicochemical, microbiological and sensory quality of dry sausage[J]. *Food Control*, 2018, 92: 190–200.
- [36] JIA W, ZHANG R, SHI LIN, et al. Effects of spices on the formation of biogenic amines during the fermentation of dry fermented mutton sausage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 321: 126723.
- [37] 郑欧阳, 孙钦秀, 刘书成, 等. 香辛料提取物复配对风干肠品质和生物胺的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(8): 90–95. [ZHENG O Y, SUN Q X, LIU S C, et al. Effects of spices extract on the quality of air-dried intestine and biogenic amines[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(8): 90–95.]
- [38] CARBALLO D E, MATEO J, ANDRÉS S, et al. Microbial growth and biogenic amine production in a balkan-style fresh sausage during refrigerated storage under a CO₂-containing anaerobic atmosphere; effect of the addition of *Zataria multiflora* essential oil and hops extract[J]. *Antibiotics*, 2019, 8(4): 227.
- [39] BOZKURT H. Utilization of natural antioxidants: Green tea extract and *Thymbra spicata* oil in Turkish dry-fermented sausage[J]. *Meat Science*, 2006, 73(3): 442–450.
- [40] 李亚倬. 雪菊精油微胶囊对熏马肠中产酪胺菌 TDC 基因表达及产酪胺影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2021. [LI Y Z. Effect of snow chrysanthemum essential oil microcapsule on TDC gene expression and tyramine production of Tyramine in Fumigated horse intestine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021.]
- [41] WANG Y L, LI F, ZHUANG H, et al. Effects of plant polyphenols and α -tocopherol on lipid oxidation, residual nitrites, biogenic amines, and N-nitrosamines formation during ripening and storage of dry-cured bacon[J]. *LWT-Food Science and Technology*

- gy, 2015, 60(1): 199–206.
- [42] ZHANG Q Q, JIANG M, RUI X, et al. Effect of rose polyphenols on oxidation, biogenic amines and microbial diversity in naturally dry fermented sausages[J]. *Food Control*, 2017, 78: 324–330.
- [43] LARANJO M, GOMES A, AGULHEIRO-SANTOS A C, et al. Impact of salt reduction on biogenic amines, fatty acids, microbiota, texture and sensory profile in traditional blood dry-cured sausages[J]. *Food Chemistry*, 2017, 218: 129–136.
- [44] 张潇, 龚吉军, 唐静, 等. 不同发酵剂与发酵条件对鲑鱼生物安全性的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(4): 205–210.
- [ZHANG X, GONG J J, TANG J, et al. Effects of different starter cultures and fermentation conditions on biological safety of fermented fish[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(4): 205–210.]
- [45] BOZKURT H, ERKMEN O. Effects of some commercial additives on the quality of sucuk (Turkish dry-fermented sausage)[J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(4): 1465–1473.
- [46] 李彬彬, 张雅晴, 赵利利, 等. 大蒜精油和发酵剂对熏马肠中生物胺及微生物分布的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(9): 19–25.
- [LI B B, ZHANG Y Q, ZHAO L L, et al. Effects of garlic essential oil and starter on the distribution of biogenic amines and microorganisms in smoked horse intestine[J]. *Food Science*, 2018, 39(9): 19–25.]
- [47] ZHANG X, WANG H H, LI X, et al. Effect of cinnamon essential oil on the microbiological and physicochemical characters of fresh Italian style sausage during storage[J]. *Animal Science Journal*, 2019, 90(3): 435–444.
- [48] 常红, 毕耀, 王颖, 等. 黑胡椒精油复合涂层对金华火腿理化特性及食用品质安全的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(13): 193–198.
- [CHANG H, BI Y, WANG Y, et al. Effects of black pepper essential oil composite coating on physicochemical properties and food quality safety of Jinhua Ham[J]. *Food Science*, 2020, 41(13): 193–198.]
- [49] 李素. 清真羊肉风干肠加工中生物胺控制技术研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- [LI S. Study on biogenic amine control technology in Halal mutton Air-dried intestine processing[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.]
- [50] DONG C H, DU X, ZHONG Q, et al. Effects of tyrosine decarboxylase negative strains from Harbin dry sausage on the growth and tyramine production of foodborne pathogens[J]. *Food Control*, 2021, 121: 107600.
- [51] ZHANG Q L, LIN S L, NIE X H. Reduction of biogenic amine accumulation in silver carp sausage by an amine-negative *Lactobacillus plantarum*[J]. *Food Control*, 2013, 32(2): 496–500.
- [52] TABANELLI G, MONTANARI C, BARGOSSO E, et al. Control of tyramine and histamine accumulation by lactic acid bacteria using bacteriocin forming lactococci[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2014, 190: 14–23.
- [53] ZHANG Y, QIN Y X, WANG Y, et al. *Lactobacillus plantarum* LPL-1, a bacteriocin producing strain, changed the bacterial community composition and improved the safety of low-salt fermented sausages[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 128: 109385.
- [54] CALLEJÓN S, SENDRA R, FERRER S, et al. Identification of a novel enzymatic activity from lactic acid bacteria able to degrade biogenic amines in wine[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98(1): 185–198.
- [55] 倪秀梅, 杨涛, 芳芳. 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 X M, YANG T, FANG F. Research progress and application of biodegradable amines[J]. *Microbiology Bulletin*, 2021, 48(11): 4398–4411.]
- [56] 谢翀. 应用植物乳杆菌降低发酵香肠中生物胺含量的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [XIE C. Study on reduction of biogenic amine content in fermented sausage by *Lactobacillus plantarum*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.]
- [57] PIŠTĚKOVÁ H, JANČOVÁ P, BERČÍKOVÁ L, et al. Application of qPCR for multicopper oxidase gene (MCO) in biogenic amines degradation by *Lactobacillus casei*[J]. *Food Microbiology*, 2020, 91: 103550.
- [58] LI C S, ZHAO Y, WANG Y Q, et al. Microbial community changes induced by *Pediococcus pentosaceus* improve the physicochemical properties and safety in fermented tilapia sausage[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110476.
- [59] 孙霞, 巩洋, 杨勇, 等. 混合菌种发酵生产低酸度川味香肠加工过程中生物胺含量的变化[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(6): 81–87.
- [SUN X, GONG Y, YANG Y, et al. Changes of biogenic amines in production of Sichuan-style Sausage with low acidity by mixed strain fermentation[J]. *Food & Fermentation Industries*, 2015, 41(6): 81–87.]
- [60] LEE Y C, KUNG H F, HUANG C Y, et al. Reduction of histamine and biogenic amines during salted fish fermentation by *Bacillus polymyxa* as a starter culture[J]. 2016, 24(1): 157–163.
- [61] 顾于滨. 金华火腿中优良菌株的筛选及其对发酵香肠品质与生物胺含量的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [GU Y B. Screening of excellent bacterial strains in Jinhua ham and its effect on the quality and biogenic amine content of fermented sausage[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.]
- [62] 许女, 李田田, 贾瑞娟, 等. 降解亚硝酸盐和生物胺乳杆菌筛选及其改善鱼肉香肠品质效果[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 304–312.
- [XU N, LI T T, JIA R J, et al. Screening of nitrite degrading and biogenic amine *Lactobacillus* and its effect on improving the quality of fish sausage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 304–312.]
- [63] 王德宝, 赵丽华, 田建军, 等. 不同发酵剂对发酵香肠中风味物质释放及有害生物胺控制的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 89–96.
- [WANG D B, ZHAO L H, TIAN J J, et al. Effects of different fermenters on the release of flavor substances and control of harmful biogenic amines in fermented sausages[J]. *Chinese Journal of Food*, 2019, 19(8): 89–96.]
- [64] SUN Q X, SUN F D, ZHENG D M, et al. Complex starter culture combined with vacuum packaging reduces biogenic amine formation and delays the quality deterioration of dry sausage during storage[J]. *Food Control*, 2019, 100: 58–66.
- [65] RODRÍGUEZGONZÁLEZ M, FONSECA S, CENTENO J A, et al. Biochemical changes during the manufacture of galician chorizo sausage as affected by the addition of autochthonous starter cultures[J]. *Foods (Basel, Switzerland)*, 2020, 9(12): 1813.
- [66] 彭荣, 蔡琮, 贺雅非, 等. 红曲霉对发酵兔肉香肠抗氧化活性及生物胺含量的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(19): 48–56.
- [PENG R, CAI Q, HE Z F, et al. Effect of *Aspergillus erythropolis* on antioxidant activity and biogenic amine content of fermented rabbit sausage[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(19): 48–56.]
- [67] 任丽娜. 降生物胺乳酸菌对发酵羊肉干品质及生物胺含量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [REN L N. Effects of biogenic amine *Lactobacillus* on quality and biogenic amine content of fermented dried mutton[D]. Hohhot: Inner Mongolia

Agricultural University, 2021.]

[68] DONG C H I, SHI S, PAN N, et al. Inhibitory mechanism of tyramine-degrading strains on reducing tyramine accumulation in Harbin dry sausage during fermentation[J]. *Food Control*, 2022, 137: 108952.

[69] 乔娜. 环境因素对腌制鱼生物胺形成的影响作用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020. [QIAO N. Study on the effect of environmental factors on biogenic amine formation in preserved fish [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.]

[70] XU Y S, XIA W S, YANG F, et al. Effect of fermentation temperature on the microbial and physicochemical properties of silver carp sausages inoculated with *Pediococcus pentosaceus*[J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(3): 512–518.

[71] WANG S, HAN J, ZHANG J B, et al. Effects of temperature on bacterial biodiversity and qualities of fermented yucha products[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2020, 29: 43–54.

[72] WEI F S, XU X L, ZHOU G H, et al. Irradiated Chinese Rugao ham: Changes in volatile N-nitrosamine, biogenic amine and residual nitrite during ripening and post-ripening[J]. *Meat Science*, 2009, 81(3): 451–455.

[73] RABIE M A, SILIHA H, EL-SAIDY S, et al. Effects of γ -irradiation upon biogenic amine formation in Egyptian ripened

sausages during storage[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(4): 661–665.

[74] UCAK I, GOKOGLU N, KIESSLING M, et al. Inhibitory effects of high pressure treatment on microbial growth and biogenic amine formation in marinated herring (*Clupea harengus*) inoculated with *Morganella psychrotolerans*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 99: 50–56.

[75] 邱春江, 夏文水, 曾雪峰, 等. 超高压处理海洋低值小杂鱼乳酸菌(*Pediococcus pentosaceus*)发酵制品中生物胺的贮藏特性研究[C]. 南京: 科技与产业对接—CIFST-中国食品科学技术学会第十届年会暨第七屆中美食品业高层论坛论文摘要集, 2013.

[QIU C J, XIA W S, ZENG X F, et al. Study on storage characteristics of biogenic amines in fermentation products of Marine low-value small fish (*Pediococcus pentosaceus*) treated by ultra-high pressure[C]. Nanjing: Docking of science and technology and Industry-the 10 th Annual Meeting of Chinese Society of Food Science and Technology and the Seventh China-U.S. High-level Forum on Food Industry, 2013.]

[76] RABIE M A, PERES C, MALCATA F X, et al. Evolution of amino acids and biogenic amines throughout storage in sausages made of horse, beef and turkey meats[J]. *Meat Science*, 2014, 96(1): 82–87.