

植物蛋白肉中挥发性不良风味物质的研究进展

肖 彤, 苏晓琳, 周 航, 解铁民

Research Progress of Volatile Off-flavor Substances in Plant-based Meat Analogues

XIAO Tong, SU Xiaolin, ZHOU Hang, and XIE Tiemin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于SPME-GC-O-MS及质构分析对烤牛肉和植物蛋白肉的感官品质探究

Research on Sensory Quality of Roasted Beef and Plant-based Meat Analogues Based on SPME-GC-O-MS and Texture Analysis

食品工业科技. 2021, 42(12): 8–18

植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展

Research Progress on Raw Material Development, Processing Technology and Nutritional Properties of Plant Based Meat

食品工业科技. 2021, 42(3): 338–345,350

鸡肉中挥发性风味物质及其影响因素的研究进展

Research Progress on Volatile Flavor Substances and Their Influencing Factors of Chicken

食品工业科技. 2019, 40(21): 337–343,351

臭豆腐挥发性风味物质的研究进展

Research progress of volatile flavor compounds in stinky tofu

食品工业科技. 2017(16): 314–317

脱皮大豆等温吸水模型与复水磨浆工艺参数优化

Isothermal Water Absorption Model of Peeled Soybean and Optimization of Process Parameters of Rehydration

食品工业科技. 2020, 41(13): 207–211,226

藏式风干牦牛肉模拟加工过程中理化特性与挥发性风味物质的变化

Changes of Physicochemical Properties and Volatile Flavor Substances in Tibetan Air-dried Yak Meat Jerky during the Simulated Processing

食品工业科技. 2021, 42(2): 19–25



关注微信公众号，获得更多资讯信息

肖彤, 苏晓琳, 周航, 等. 植物蛋白肉中挥发性不良风味物质的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 1–11. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120128

XIAO Tong, SU Xiaolin, ZHOU Hang, et al. Research Progress of Volatile Off-flavor Substances in Plant-based Meat Analogues[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(18): 1–11. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120128

· 未来食品 ·

植物蛋白肉中挥发性不良风味物质的研究进展

肖 彤¹, 苏晓琳², 周 航¹, 解铁民^{1,*}

(1.沈阳师范大学粮食学院, 辽宁沈阳 110034;

2.沈阳师范大学试验中心, 辽宁沈阳 110034)

摘要:植物蛋白肉是一种以植物蛋白为原料, 模仿肉形色和味道的蛋白制品。风味是影响植物蛋白肉公众接受度的主要因素之一。植物蛋白肉中的不良风味主要是源于豆类本身以及不饱和脂肪酸氧化, 其限制了植物蛋白肉在消费者中的推广。针对这一问题, 本文简单概述了植物蛋白肉的定义, 着重分析了植物蛋白肉中引起豆腥味的挥发性不良风味物质的产生途径以及加工过程对挥发性不良风味物质的影响, 并提出了去除或掩蔽植物蛋白肉不良风味的两种思路: 抑制脂肪氧化酶活性和降低挥发性风味滞留率, 旨在为后续植物蛋白肉风味方面的研究提供参考依据。

关键词:挥发性不良风味物质, 豆腥味, 植物蛋白肉, 脂肪氧化酶

中图分类号:TS214 文献标识码:A 文章编号:1002-0306(2022)18-0001-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120128



本文网刊:

Research Progress of Volatile Off-flavor Substances in Plant-based Meat Analogues

XIAO Tong¹, SU Xiaolin², ZHOU Hang¹, XIE Tiemin^{1,*}

(1. College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China;

2. Test Center, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: Plant-based meat analogue is a protein product that uses plant protein and mimics the color and taste of meat. Flavor is one of the main factors that affect the public acceptance of plant-based meat analogue. The bad flavor in plant-based meat analogue mainly derived from the beans themselves as well as the oxidation of unsaturated fatty acids, which limits the promotion of plant-based meat analogue among consumers. In view of this problem, this article briefly summarizes the definition of plant-based meat analogue, focuses on analyzing the volatile off-flavor characteristics of plant-based meat analogue and the influence of processing process. Two ways of removing or masking the bad flavor of plant-based meat analogue: Inhibiting fat oxidase activity and reducing volatile flavor retention, aim to provide reference for subsequent research on plant-based meat analogue flavor.

Key words: volatile off-flavor substances; beany flavor; plant-based meat analogue; lipoxidase

据统计, 到 2050 年全球人口可能会达到 100 亿^[1]。人口增长会促使肉制品的消耗增加, 估计到 2030 年, 肉类消费需求将增加 72%^[2]。另外, 肉类生产过

程的本质是将植物蛋白转化为动物蛋白, 这一过程的效率极低^[3-4], 并且占用大量的资源(水、土地以及能源等)。Pimmentel 等^[3]估计肉类生产过程中消耗水

收稿日期: 2021-12-13

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目 (2019JH1, 10200002)。

作者简介: 肖彤 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: 13941792948@163.com。

* 通信作者: 解铁民 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: tieminxie@163.com。

是谷物生产过程中消耗水的 100 倍。同时,肉类的生产会导致大量二氧化碳、甲烷和一氧化二氮等温室气体排放,增加了环境负担^[5]。2015 年 9 月,世卫组织国际癌症研究机构(IARC)将加工肉类(如烟熏肉、火腿、培根和香肠等)列为 I 类致癌物,并将牛肉、猪肉、羊肉等红肉列为 II A 类致癌物^[6]。出于这些原因,人们更倾向于用植物蛋白替代动物蛋白,并认为这有助于降低人体胆固醇含量和高血压患者的血压水平,从而减少脑卒中、冠心病以及癌症等疾病的发生^[7]。同时,Bonny 等^[8]的研究中也指出植物蛋白肉可以解决由于肉类消费引起的环境、卫生和健康等问题。植物蛋白肉还具有高蛋白、低脂肪和低胆固醇等优点,是一种绿色、健康和安全的食品^[9-10],并且植物蛋白中的某些功能成分(如异黄酮、皂甙)在抗衰老、降血压和促进矿物质吸收等方面起着重要作用^[11]。Bryant 等^[12]调查了植物蛋白肉的消费情况,结果发现消费植物蛋白肉的人数从 2019 到 2020 增长了 7%。

目前探究改善植物蛋白肉的质地方面,主要是通过研究植物蛋白肉纤维形成机制来改善植物蛋白肉的质地^[13-15]。除此之外,多糖可用作交联剂来改变蛋白质的构象,通过美拉德反应与蛋白质结合,产生蛋白质网络结构,以提高植物蛋白肉的口感^[16]。然而,消费者对植物蛋白肉的风味评价并不满意^[17],其主要原因之一是植物蛋白肉自身存在豆腥味^[18]。目前在市面上的植物蛋白肉原料主要是豆类蛋白,在加工过程中不可避免会产生豆腥味物质,这种不良风味物质制约了植物蛋白肉的生产、消费以及推广^[11]。因此,如何去除或掩蔽豆腥味成为目前植物蛋白肉推向市场和消费者,使其接受与认可植物蛋白肉的关键问题。

综上所述,为了探究解决植物蛋白肉中豆腥味问题的方法,本文对植物蛋白肉中风味物质组成成分进行了概述,介绍了引起豆腥味的挥发性不良风味物质的形成途径和加工工艺对挥发性不良风味物质含量影响,总结了降低挥发性不良风味物质含量和掩盖植物蛋白肉中挥发性不良风味物质的常用方法,为后续植物蛋白肉在风味上的改良提供参考。

1 植物蛋白肉概述

植物蛋白肉是一种以大豆蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白、扁豆蛋白、蚕豆蛋白和鹰嘴豆蛋白等植物蛋白为主要原料,经过挤压加工、静电纺丝和热剪切法等方法生产的组织化蛋白产品(成品蛋白质含量在 50% 以上),内部拆丝可以得到类似熟肉纹理的结构^[19-22]。由于挤压技术具有生产过程简单、生产效率高、质量稳定等优点,其被广泛应用于植物蛋白肉的生产中。根据植物蛋白肉原料的含水率不同可以分为低水分组织化蛋白(水分含量 20%~40%)和高水分组织化蛋白(水分含量 40%~80%)^[23]:低水分组织化蛋白产品的纤维结构不明显,呈疏松多孔状,由

于其水分含量低,便于保存和运输,但是食用之前需要进行复水处理^[24],与动物肉的相似程度低;高水分组织化蛋白产品的纤维结构致密,水分含量高,可直接食用,类肉程度高^[17],是比较理想的动物肉替代产品,正逐步成为研究的热点^[20]。

高水分组织化植物蛋白过程中,豆类蛋白质(主要是大豆和豌豆蛋白)通常与膳食纤维、脂质、调味剂以及增稠剂一起在高温下挤压成复合肉状纤维结构^[25],在此过程中蛋白分子链受热展开、团聚、聚集和交联,使得维持天然蛋白质高级空间结构的次级键发生改变,其中二硫键被认为是植物蛋白肉纤维形成的必要条件^[14]。此外,挤压参数对于植物蛋白肉纤维结构的形成具有重要意义。Kyriakopoulou 等^[26]的研究认为挤压温度很大程度上决定了植物蛋白肉的纤维结构,并在特定的熔融温度下蛋白质之间发生交联反应形成纤维结构。Samard 等^[10]研究发现相比于含水量和挤压温度,螺杆转速对植物蛋白肉纤维结构的影响较小,并且当挤压温度为 130 ℃、螺杆转速为 200 r/min 以及水分含量为 70% 时,植物蛋白肉的纤维结构最明显。因此,在挤压过程中,挤压温度和水分含量的变化对植物蛋白肉纤维结构的形成影响较大。

2 植物蛋白肉的挥发性不良风味物质的形成途径及加工所引起的变化

2.1 植物蛋白肉中的挥发性不良风味物质及来源

植物蛋白肉的主要原料是豆类蛋白,而豆类蛋白在加工和储藏过程中容易产生各种各样的风味物质,其中有带香味的挥发性风味成分,如苯甲醛、戊醛、2-庚烯酮、3-烯酮、3-烯醇、戊酸、2-呋喃甲醇、苯乙醇、3-辛烯-2-酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、庚醛、麦芽酚、苯丙醛和 E-2-己烯醛等^[27]。同时不可避免也会产生一些不良的风味,一般可将植物蛋白肉中存在的不良风味分为两类,一类是可被味觉感知的苦涩味和金属味,这主要是由异黄酮、呋喃、酚类化合物以及皂苷等物质引起^[28],另一类是可被嗅觉感知的豆腥味,它主要是由多种小分子挥发性风味成分按不同比例结合而产生的^[29]。目前,被报道的引起豆腥味的挥发性风味成分有九种^[30]:己醛(青草味、叶子味)、己醇(绿草味、割草味)、(E)-2-己烯醛(腐臭味、割草味)、(E)-2-壬烯醛(黄瓜味)、(E,E)-2,4-癸二烯醛(草药味)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(青草味)、1-辛烯-3-酮(煮熟菇类)、1-辛烯-3-醇(蘑菇味)和 2-戊基呋喃(青草味、叶子味)。其中 2-戊基呋喃、己醛是豆类制品中的主要豆腥味成分^[31-32],它是豆类中的亚油酸经由光氧化产生的一种挥发性风味物质^[33]。这些引起豆腥味的不良风味物质有一部分来自豆类原料本身,这是由于在豆类的生长和储藏过程中,脂肪氧化酶(lipoxidase, LOX)促进多不饱和脂肪酸衍生物降解产生不良风味物质^[34]。此外,后续的加工也可能形成不良风味物质。研磨是生产豆类产品过程

中不可或缺的一步, 豆类的研磨可能会加重豆腥味^[35], 这可能是由于研磨会提高物料的温度, 促使物料发生热诱导降解反应, 从而产生不良风味物质。在组织化植物蛋白过程中, 含羰基的挥发性风味物质含量明显降低, 新形成了 2-戊基吡啶和吡嗪; 同时挤压方式不同, 物料的风味也会有变化, 低水分挤压会使挤压出物中的豆腥味明显降低, 这可能与其疏松多孔的结构有关, 而高水分挤压则会增加挤压出物中的豆腥味^[36]。

2.2 挥发性不良风味物质的形成途径

脂质氧化及其相关代谢途径的副产物是豆类制品中挥发性不良风味物质主要来源^[37-39]。挥发性不良风味物质形成途径主要有自动氧化、光敏氧化、LOX 诱导的酶促反应以及蛋白质的降解^[40], 在上述四种形成途径中, LOX 诱导的酶促反应是组织化豆类蛋白过程中产生不良风味的主要途径^[41]。

自动氧化是由天然色素产生的单线态氧引发的自由基反应, 反应产物(氢过氧化物)极易裂解为具有不良风味的醛类、酸类等化合物; 光敏氧化是单线态

氧直接与不饱和脂肪酸发生反应生成氢过氧化物, 从而发生裂解产生具有不良风味的物质^[42]; 脂肪氧化酶诱导的酶促反应是指 LOX 将亚油酸和亚麻酸中的 1, 4-顺戊二烯结构催化氧化形成氢过氧化物的衍生物, 这些衍生物进一步降解为具有不良风味的物质^[43], 亚油酸和亚麻酸酶促反应形成挥发性不良风味化合物的途径如图 1 所示。首先, 脂肪酶催化脂质分解为亚麻酸和亚油酸, 随后 LOX 可以催化脂肪酸转化为氢过氧化物衍生物^[44], 氢过氧化物裂解酶催化反应生成短链醛类物质, 醛类物质在乙醇脱氢酶的作用下进一步分解为醇类物质, 这些醛类和醇类物质共同构成了豆腥味^[45]。蛋白质降解是指蛋白质通过 Strecker 降解反应和蛋白质水解反应后生成醛类、呋喃类和杂环芳烃化合物^[28]。

除了以上的四种途径会形成不良风味物质以外, 挥发性不良风味物质还能与蛋白质发生相互作用, 从而使不良风味物质滞留在植物蛋白肉中, 同时它也是豆腥味难以去除的主要因素之一^[46]。蛋白质与挥发性风味物质的相互作用是指蛋白质与醛、酮

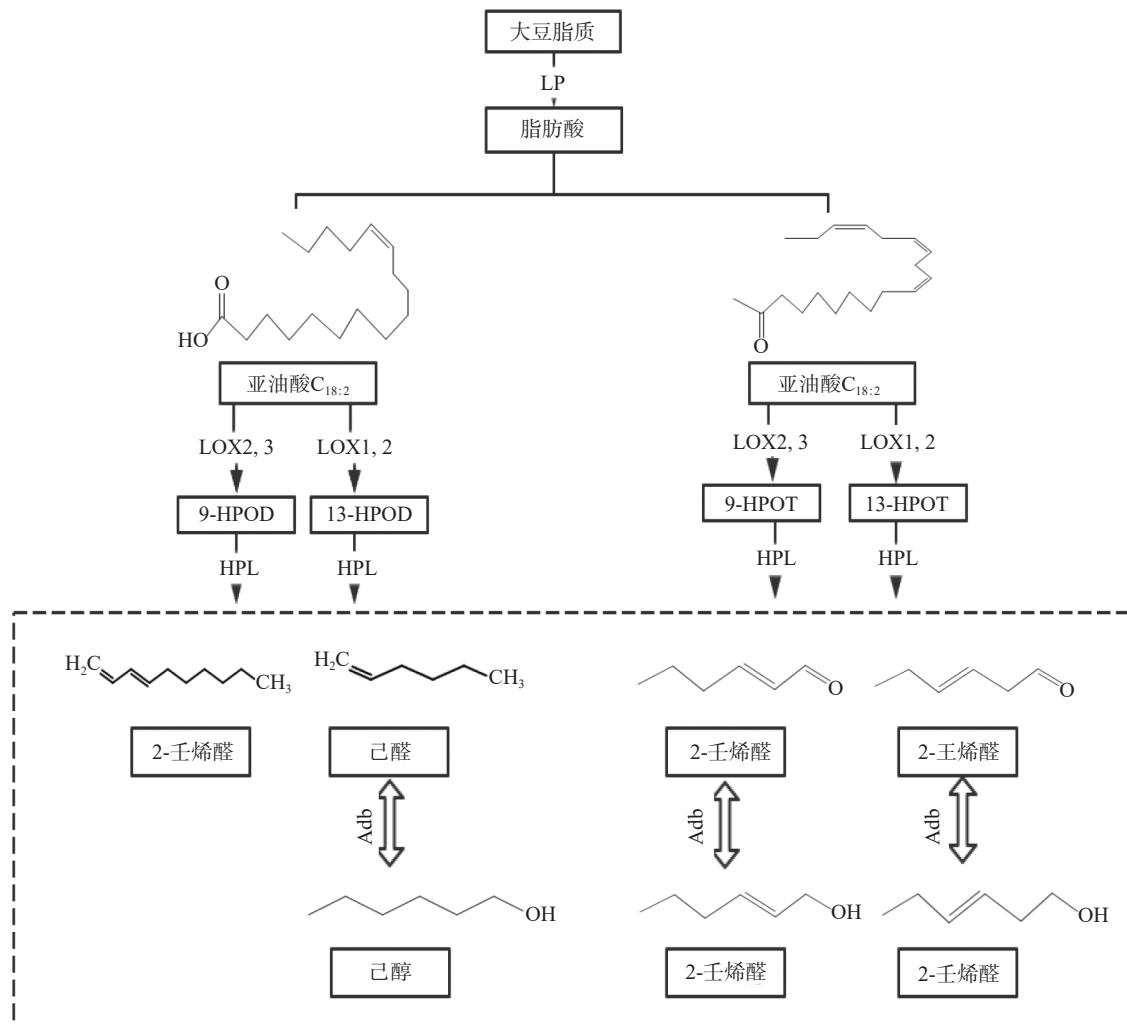


图 1 亚油酸和亚麻酸酶促反应形成挥发性不良风味化合物的途径^[40]

Fig.1 Enzymatic reaction of linoleic acid and linolenic acid to form volatile undesirable flavor compounds^[40]

注: LP-脂肪酶; LOX-脂肪氧化酶; HPOD-亚油酸氢过氧化物; HPOT-亚麻酸氢过氧化物; HPL-氢过氧化物裂解酶; ADH-乙醇脱氢酶。

类物质的结合从而抑制挥发性不良风味物质的挥发^[47], 相对于酮类物质, 醛类物质与蛋白质的结合能力更强。蛋白质与挥发性风味物质之间的相互作用可以分为可逆和不可逆相互作用, 可逆相互作用主要是挥发性风味物质与蛋白质的-COOH、-SH、-NH₂ 和-OH 通过氢键、疏水键和离子键结合, 不可逆相互作用主要是挥发性风味物质与蛋白质的-S-S-、-SH、-NH₂ 之间形成了牢固的共价键, 赖氨酸、精氨酸和半胱氨酸含量高的蛋白质更容易与挥发性风味物质共价结合^[48]。此外, Zhou 等^[49] 研究表明极性强的挥发性风味物质可能通过离子键增强其与蛋白质的相互作用。Joshi 等^[47] 认为大豆 7S 球蛋白相比于 11S 球蛋白更适合作为植物蛋白肉的原料, 这是因为 11S 球蛋白中含有大量的含硫氨基酸, 这类氨基酸更容易与不良风味物质结合。除此之外, 挥发性不良风味物质的分子结构也会影响蛋白质和挥发性不良风味物质的结合。丁醇与蛋白质的亲和力高于己醇, 并且同一类挥发性物质与蛋白质的亲和力是随着碳链长度的增加而增加的^[50]。

综上所述, 组织化豆类蛋白过程中产生挥发性不良风味物质的途径主要有四种, 其中 LOX 的酶促氧化途径是产生豆腥味的主要途径。此外, 蛋白质与挥发性风味物质的相互作用会使挥发性风味物质滞留。

2.3 加工工艺对挥发性不良风味物质的影响

植物蛋白肉的原料大多都需要从豆类中提取蛋白, 目前豆类蛋白的提取方法有碱溶酸沉法、乙醇提取法、膜分离法、酶解酸沉法和离子交换法^[51], 但不同制备方法制得的豆类蛋白样品所含的挥发性风味物质组分不同。王丽娟等^[52] 采用 GC-MS 测定碱溶酸沉法、逆流萃取法和膜超滤浓缩法 3 种方法制备的大豆蛋白的挥发性风味物质, 结果表明, 用逆流萃取法提取大豆蛋白的挥发性风味物质的含量最低, 并且用不同提取方法得到的大豆蛋白的挥发性风味组分不同, 色泽不同, 气味和滋味也差别明显。Zhao 等^[53] 分别用 0、2、4、6 和 8 h 的研磨时间制备大豆分离蛋白粉末, 并测定其风味物质, 结果发现, 研磨时间不同大豆分离蛋白粉末的挥发性风味物质的组分也不同, 与研磨时间为 0 h 的大豆分离蛋白粉末相比, 研磨时间为 2、4、6 和 8 h 的大豆分离蛋白粉末有更高的挥发性物质总含量。此外, 尽管一些提取豆类蛋白的方法可以有效地降低挥发性不良风味物质的含量, 但豆类本身自带的非挥发性不良风味前体物质会因为与蛋白质结合或加工残留带入到提取的豆类蛋白之中, 这些非挥发性不良风味前体物质会在后续的储藏加工中降解为挥发性不良风味物质^[54]。

经提取后的豆类蛋白通常需要进行干燥, 干燥脱水有助于避免豆类蛋白变质, 同时有利于后续的深加工处理。常见的干燥方式有热风干燥、微波干燥、冷冻干燥以及喷雾干燥, 不同的干燥方式产生的挥发

性不良风味物质含量也不同。李慧勤等^[55] 测定了不同的干燥方式的豆渣风味成分, 结果表明晾干豆渣中的挥发性不良风味物质的种类和含量是最多的, 有 8 种主要豆腥味成分, 它们的总含量占总风味物质含量的 22.10%; 热风干燥豆渣仅有一种豆腥味成分, 即己醛(0.96%); 微波干燥豆渣有 3 种主要的豆腥味成分, 占总风味物质的 9.75%; 经真空干燥的豆渣豆腥味成分有 4 种, 占总风味物质的 11.22%; 真空冷冻干燥后豆渣豆腥味成分较少, 仅占总风味物质的 1.81%。Ma 等^[56] 分别用冷冻干燥和喷雾干燥来干燥豌豆蛋白浓缩液, 结果发现豌豆蛋白浓缩液经过喷雾干燥后, 醛类物质的含量增加, 而其他的风味物质含量均有所减少; 豌豆蛋白浓缩液经过冷冻干燥后, 其风味物质的含量没有变化, 这表示冷冻干燥会保留原料中的风味物质同时避免产生新的风味物质。因此, 植物蛋白肉的原料可以选择经过热风干燥或真空冷冻干燥后的蛋白原料, 以减少植物蛋白肉中的豆腥味。

除了豆类蛋白提取工艺不同会造成风味挥发性物质组分不同之外, 挤压加工也可能会引起风味挥发性物质组分的改变。在挤压加工过程中, 豆类蛋白会在高温、高压以及高剪切作用下变性, 次级键发生改变, 醛类和醇类化合物更易于与豆类蛋白通过氢键结合, 从而更有利于豆腥味成分的滞留^[57]。并且随着豆类蛋白含量的增加, 不良风味物质的含量也有所增加^[58]。Yuan 等^[59] 发现生豆浆中总己醛以及总挥发性风味物质的含量与蛋白质的含量成正比。另一方面, 由于挤压组织化蛋白, 其内部会形成凝胶网络结构, 可能会增加风味物质在其中的附着位点, 使风味挥发性物质滞留, 从而导致不良风味物质含量增加^[13,60]。

一些研究发现对豆类蛋白进行热处理会降低其挥发性不良风味物质的含量, 这可能是因为豆类原料加热后会使得一部分脂肪氧化酶失活, 减少了脂肪氧化酶诱导的酶促反应。Sun 等^[61] 研究表明在研磨大豆时, 升高温度可有效地降低风味前体物质和油脂衍生的不良风味物质的含量。Jiang 等^[62] 的研究发现对蚕豆进行微波处理, 可有效地降低脂肪氧化酶和过氧化物酶的活性, 从而有效地减少了豆腥味, 并且蚕豆在 950 W 的微波炉中加热 1.5 min 是最佳的处理条件, 此时既不会破坏蚕豆蛋白的功能性质, 也能有效减少豆腥味。同时, 热处理也会使豆类形成新的香气物质掩盖豆制品中的不良风味物质。Shuang 等^[63] 比较生豌豆和烤豌豆中的关键香气物质, 结果表明烤豌豆的关键香气物质种类增加, 烘烤过程中产生的吡嗪和吡喃酮可以掩盖豌豆的豆腥味。Ma 等^[56] 的研究发现热处理过程中产生的吡嗪和烷基化吡嗪等香气物质对豆腥味有一定的掩蔽作用。因此, 热处理在某种程度上可以改善豆类制品风味, 这一结论或许可以运用到改善植物蛋白肉中的不良风味。

通常挤压后的植物蛋白肉会经真空包装后储

存, 储存的温度和湿度是促使不良风味物质产生的关键因素, 植物蛋白肉在较高的温度和湿度条件下储存会加速植物蛋白肉产生不良风味物质^[64]。Mehle 等^[65]监测了在不同水分含量和温度下储存的豌豆制品的风味物质浓度变化, 结果发现温度为 37 ℃, 高水分活度时风味物质的浓度变化最大(1-辛烯-3-醇和壬醛的不断生成), 这说明豌豆制品在储藏过程中产生不良风味物质的主要原因是脂质氧化。此外, 低温储藏可有效的降低 LOX 的活性, 从而抑制豆腥味成分的产生。植物蛋白肉在-18 ℃ 下储藏, LOX 的活性降低了 20%^[66]。杜雅荣等^[67]的研究发现 LOX2 缺失大豆制品在 0 ℃ 储藏相比于 20 ℃ 储藏, 其不良风味物质降低了约 18.70%, 而正常大豆制品在 0 ℃ 储藏时, 不良风味物质降低了约 21.67%。因此, 植物蛋白肉在储藏过程中, 可以选择低温储藏以减少豆腥味成分的产生。

3 去除或掩蔽植物蛋白肉中挥发性不良风味方法

加工工艺不同以及加工条件不同都会影响植物蛋白肉中挥发性不良风味物质的含量, 但想要完全去除植物蛋白肉中挥发性不良风味物质, 还需要从挥发性不良风味物质产生的主要原因和滞留情况进行分析。挥发性不良风味物质产生的主要原因是脂肪氧合酶诱导的酶促氧化反应, 所以在加工过程中抑制或钝化脂肪氧合酶的活性, 从而减少不饱和脂肪酸降解产生挥发性风味物质是一个有效的方法。此外, 挥发性风味物质滞留在植物蛋白肉中的主要原因是蛋白质与挥发性风味物质发生了可逆或不可逆的结合, 所以在加工过程中去除或掩蔽挥发性不良风味物质是一个可行的方法。

3.1 抑制 LOX 活性的方法

3.1.1 培育新豆类品种 植物蛋白肉产生挥发性不良风味物质的主要原因是豆类中存在脂肪氧合酶促进不饱和脂肪酸降解, 从而产生挥发性不良风味物质^[68], 所以去除豆类本身的脂肪氧合酶是最有效的办法。目前, 有通过基因工程等遗传学的方法培育出不含脂肪氧合酶的大豆品种以减少豆类在加工过程中产生的异味, 如黑龙江省农科院绥化农科所选育的绥无腥豆 2 号, 这种大豆不含脂肪氧合酶 LOX1 和 LOX2, 没有豆腥味, 并且食用口感较好^[69]。研究显示, 缺乏 LOX1 和 LOX2 的大豆挥发性物质的含量显著降低, 而缺乏 LOX3 的大豆会增加己醛的含量, LOX1、LOX2 以及 LOX3 都缺失的大豆不良风味物质的生成量最低^[70]。王丹等^[71]应用 RNA 干扰技术同时抑制大豆脂肪氧合酶和胰蛋白酶抑制剂基因的表达, 培育出缺失大豆脂肪氧合酶和胰蛋白酶抑制剂的大豆。Yang 等^[72]在研究中发现不含脂肪氧合酶的大豆产生的氢过氧化物衍生物和己醛含量远低于普通大豆品种。同时目前也有研究显示无脂肪氧合酶的豆类品种在品质上也可以得到改善。Esteves 等^[73]

比较了 LOX2 和 LOX3 缺失的大豆品种和普通大豆品种的营养成分, 结果发现 LOX2 和 LOX3 缺失的大豆品种含有更多的氨基酸和人体必需的常量金属元素。但是培育缺失 LOX 的豆类品种也会有一定的局限性, 它并不能去除能生成挥发性不良风味物质的反应底物(磷脂和游离脂肪酸)^[54]。Ma 等^[74]的研究检测了两个相近的基因(含或不含 LOX)的大豆制成的豆浆风味特性, 结果发现缺失 LOX 与普通豆浆风味参数之间没有显著相关性, 这说明除了 LOX 催化不饱和脂肪酸降解, 豆浆中的不饱和脂肪酸本身也会氧化酸败。

综上所述, 这种缺失 LOX 的豆类品种确实是加工植物蛋白肉的理想原料, 它既可以减少由于豆腥味而增加的加工工艺流程, 又可以显著降低挥发性不良风味物质的含量。但是缺失 LOX 的豆类品种中仍会存在挥发性不良风味物质的反应底物, 这些反应底物仍会在之后的加工和储藏中降解, 生成挥发性不良风味物质。

3.1.2 运用物理或化学方法改性 在去除植物蛋白肉原料的豆腥味方面, 除了培育不含脂肪氧合酶的大豆之外, 还可以通过改性来抑制豆类蛋白粉中脂肪氧合酶的活性, 例如热处理、 γ 辐射、脉冲电场技术以及酸碱法等手段。加热是豆类加工过程中去除豆腥味最常用的方法, 目前除了传统的加热方式之外, 微波加热和射频加热这两种新型的加热手段也在去除豆类制品的不良风味上有了广泛的运用^[75]。张岚等^[76]在高温、高压和高剪切作用条件下处理豆渣, 结果表明, 产品中未检出己醛、2-戊基呋喃、酮类和醇类等不良风味物质, 并形成多种酯类物质使产品风味得到明显改善。此外, γ 射线辐照也能够有效的降低豆类蛋白粉中 LOX 的活性, 这种方法相对于热处理的优点是可以降低营养物质的损耗。Tewari 等^[77]的研究表明低剂量 γ 辐照可以有效减少大豆中的不良风味物质, 提高大豆的抗氧化能力。脉冲电场技术是一种非热食品灭菌和钝酶的方法, 它能够很好地保留食品的味道、颜色、质地和营养。当前已有研究证明脉冲电场技术能够很好的抑制 LOX 的活性, Li 等^[78]用 42 kV/cm 脉冲电场, 400 Hz 脉冲频率和 2 μ s 脉冲宽度下处理大豆后发现 LOX 的最大失活率高达 88%。酸碱处理法主要是通过调节酸碱度, 使其偏离 LOX 的最适 pH, 破坏 LOX 的二硫键和巯基, 达到降低 LOX 活性的目的^[63], 这种方法可以优化豆类蛋白粉的整体风味^[79]。

综上所述, 热处理、 γ 辐射、脉冲电场技术以及酸碱法等物理或化学方法均是改变 LOX 的构象来抑制 LOX 的活性, 从而减少由脂肪氧合酶诱导的酶促反应这一途径产生的挥发性不良风味物质。但是要想完全去除引起豆腥味的挥发性不良风味物质, 这些方法可能还需要与能够去除不良风味前体物质的方法相结合。

3.1.3 改变挤压条件 挤压技术融合了高温、高压和高剪切作用, 可有效防止 LOX 诱导的脂质氧化, 从而改善豆类产品的风味^[80]。在不同挤压条件下挤压大豆分离蛋白, 挤出物的挥发性风味物质的滞留率以及不良风味物质的含量不同^[81]。Menis 等^[82]探讨了低水分挤压对风味物质异戊酸、丁酸乙酯和丁酸保留率的影响, 结果发现挤压参数(挤压温度、水分含量以及螺杆转速)的改变的确会影响挤出物的感官接受度。随着挤压温度越高, 豆类蛋白中 LOX 的活性越低, 不良风味物质的含量降低。同时挤压温度会影响植物蛋白肉中挥发性风味物质的保留率, 关丽娜等^[83]用 120、150、180 ℃ 的挤压温度, 挤压豌豆粉并分析其挥发性风味物质, 结果表明不良风味物质成分得分最低的是挤压温度为 180 ℃, 其得分为 0.70394, 挤出物中的不良风味物质反-2-辛烯醛、己醛、1-辛烯-3-醇、正己醇、1-戊醇、正丁醇和 2-戊基呋喃的相对含量降低。其次是挤压温度为 150 ℃ 挤出物的得分为 0.98858。挤压温度为 150 ℃ 时挤出物不良风味成分的得分最高, 其值为 1.62783。因此, 挤压处理可以减弱豌豆中不良风味。寻崇荣等^[60]研究发现随着温度的升高, 挥发性风味物质的保留率呈现先增加后减小的趋势, 这可能是由于温度升高, 植物蛋白肉的结构更紧密, 更易吸附挥发性风味物质, 随着温度不断升高, 植物蛋白肉中的水分蒸发量增大, 带走了更多的挥发性风味物质。

此外, 改变物料的水分含量也可能对不良风味物质的含量有影响, 高水分挤压可能会更有利于不良风味物质的保留, 低水分挤压可以有效的降低不良风味物质的含量。Sandra 等^[84]用低水分挤压和高水分挤压分别处理豌豆分离蛋白, 并用气相色谱-质谱嗅觉仪分析这两种处理方法对豌豆分离蛋白中挥发性物质的影响, 结果表明低水分挤压使脂肪氧化的中间产物减少了 40%, 有效减少了豌豆蛋白中不良风味物质的含量, 而高水分挤压会增加不良风味物质的含量, 因此低水分挤压可能是减少豌豆蛋白中不良风味物质的有效方法。Guo 等^[85]将大豆浓缩蛋白和小麦蛋白分别在 50%、60%、70% 和 80% 的水分含量下挤压, 结果发现总挥发性风味物质随着水分含量的增加而减少, 这可能是由于随着原料含水量的不断增加, 肉类类似物在挤压机模口处水分蒸发的增加降低了挥发性风味物质滞留率。

挤压过程中螺杆转速的变化也会对植物蛋白肉的风味有影响, 这可能与植物蛋白肉的结构有关(螺杆转数越高, 植物蛋白肉的孔隙率越小, 结构越致密)。寻崇荣等^[86]研究发现挥发性风味物质的总保留率会随着螺杆转速的增加呈现出先增多后减少的变化趋势, 这可能是由于随着螺杆转速的增大, 植物蛋白肉的结构致密更容易吸附挥发性风味物质, 但随着螺杆转速的不断增加, 蛋白质与挥发性风味物质的作用时间缩短, 并且挤出物水分挥发也会带走一部分

挥发性风味物质, 从而导致挥发性风味物质的保存率降低。

综上所述, 培育新豆类品质、运用物理或化学方法改性以及改变挤压条件都是为了抑制 LOX 的活性, 避免 LOX 催化不饱和脂肪酸降解, 产生挥发性不良风味物质, 但在豆类蛋白中的非挥发性不良风味前体物质(磷脂和游离脂肪酸)在加工和储藏中还能降解产生挥发性不良风味物质。因此, 挥发性不良风味物质的完全去除还需要将抑制 LOX 的活性与去除不良风味前体物质的方法相结合。

3.2 去除或掩蔽挥发性不良风味物质的方法

蛋白质与风味物质的相互作用是造成挥发性风味物质滞留的最重要的因素, 所以可以考虑去除或掩蔽挥发性风味物质以及非挥发性不良风味前体物质, 以降低挥发性风味物质滞留率, 从而达到去除豆腥味的目的。

3.2.1 溶剂萃取 豆类蛋白粉已经去除了大量的脂质(甘油三酯), 但是仍然有一些极性脂质(游离脂肪酸、磷脂和溶血磷脂)无法去除, 这些脂质容易在后续的储藏和挤压加工中氧化降解, 从而产生一些挥发性不良风味物质^[87]。Bader 等^[88]研究认为有机溶剂可以有效的去除豆类蛋白中的极性脂质以及不良风味物质。Cca 等^[89]用有机溶剂(丙酮、乙醇和异丙醇)处理扁豆分离蛋白, 结果发现乙醇和异丙醇降低总挥发性风味物质的含量的效果显著。Wang 等^[90]研究了乙醇和异丙醇两种水溶剂在三种浓度水平下对空气分级豌豆蛋白强化面粉的除味效果, 并对空气分级豌豆蛋白强化面粉中的风味化合物进行鉴定, 结果表明, 有机溶剂在去除不良风味物质方面效果比较好。但这种方法可能会改变蛋白质的构象, 破坏蛋白质的一些功能性质^[91], 这可能会影响深度加工产品的品质, 同时食品中溶剂残留问题也需要进一步考虑。Murillo 等^[25]的研究表明原料的蛋白变性程度高, 溶解度低, 则其制备的植物蛋白肉的组织化程度低。

3.2.2 酶处理 酶处理可以很好的改善豆类原料中的豆腥味, 它是利用酶的专一性, 选择性地作用于醇类和醛类底物, 将这些小分子化合物通过酶反应转变成相应的酸, 以达到去除豆腥味的目的^[92]。张平安等^[93]利用麦芽粉中的醛脱氢酶(ALDH)对大豆进行脱腥处理, 从而有效消除大豆中的豆腥味, 通过测定己醛的含量, 结果发现小麦芽粉添加量为 2%, 温度为 45 ℃, 作用时间为 2.5 h 时豆腥味最低。但在 Song 等^[94]的研究中表明尽管酶处理可以减少一些不良风味物质成分, 但它也会增加一些其他不良风味物质。近几年, 有一种新型的方法是将磷脂酶与 β -环状糊精结合的方法去除豆类蛋白中的不良风味物质, 这种方法既能够有效地去除不良风味物质, 又能保留豆类蛋白的天然结构, 并且最小程度的改变豆类蛋白的功能性质^[54]。磷脂酶主要通过促进磷脂的水解, 随后利用 β -环糊精和其他环糊精与豆类中的不饱和脂肪

酸和磷脂水解物形成水溶性化合物^[54,95]。Arora 等^[96]采用了超声波、磷脂酶 A2 和环糊精组合处理大豆蛋白,发现这种方法能很好地去除大豆蛋白中的磷脂,并且己醛的去除率高达 92%,但这种方法容易将其他脂肪族化合物一并去除,造成大豆蛋白中营养的损失。Zhu 等^[97]用磷脂酶 A2 和环糊精同时处理大豆分离蛋白,处理后的大豆分离蛋白不良风味的前体物质减少了 92%,将处理后的大豆分离蛋白与未经处理的大豆蛋白相比较,经处理的大豆分离蛋白生成己醛的速率要比未经处理的大豆蛋白慢 12 倍,经处理的大豆蛋白的一些结构被改变,但其溶解度未发生变化。因此,将被酶处理过的大豆分离蛋白作为挤压原料,或许可以在降低植物蛋白肉中的豆腥味的同时,还不会影响植物蛋白纤维的形成。

3.2.3 添加风味物质 改善植物蛋白肉风味的传统方法是添加风味物质来掩蔽和改善植物蛋白肉中的豆腥味,但在挤压过程中直接添加风味物质,挤出物的风味保留率不高,无法达到掩蔽植物蛋白肉中豆腥味的目的。Palkert 等^[98]将挥发性风味物质直接添加到脱脂大豆粉中,混合后静置反应 45 min 后进行低水分挤压(物料含水量 30%),结果发现挤出物中的挥发性风味物质平均回收率不到 10%,风味损失严重。Milani 等^[84]在大豆分离蛋白中加入风味增强剂(肌苷酸二钠和味精),经低水分挤压后发现挤出物的最高挥发性风味物质的保留率为 27% 左右。Yuliani 等^[99]利用酪蛋白酸钠微胶囊技术包埋风味物质柠檬烯,经低水分挤压后发现柠檬烯保留率受挤压条件的影响较大,平均保留率为 65%。

此外,利用美拉德反应产物来增强豆类制品的风味,同时掩蔽植物蛋白肉的不良风味,可能是一种有效的方法^[100]。Zhang 等^[101]在 pH7.6 的条件下加热木糖和大豆肽 2 h 得到美拉德反应产物,制得的美拉德反应产物与半胱氨酸分别在 80、100、120 和 140 °C 的条件下混合,结果在样品中检测到了 63 种含硫化合物,其中有 51 种是含硫杂环化合物,这类化合物气味阈值较低,能够改善食品风味。Habinshuti 等^[102]将葵花籽蛋白、大豆蛋白、玉米蛋白这三种蛋白的水解物分别与木糖和半胱氨酸在 pH7.4 和温度为 120 °C 的油浴下加热 2 h,根据感官评价得到大豆蛋白水解物得到的美拉德反应产物可以改善食品风味。因此,可以考虑在挤压豆类蛋白过程中加入多肽和单糖,同时提高挤压温度,以便于生成美拉德反应产物掩蔽植物蛋白肉中的豆腥味。

综上所述,从去除非挥发性不良风味前体物质和挥发性不良风味物质两个角度去考虑消除植物蛋白肉中的豆腥味,能够有效的降低植物蛋白肉中的不良风味物质。但这些方法仍有一些弊端。溶剂萃取法虽然去除非挥发性不良风味前体物质的效果好,但是容易影响豆类蛋白的构象和功能,还可能导致豆类蛋白中的溶剂残留。酶处理法去除豆腥味虽然安全

但是效率低,不适用于工厂的大批量加工。 β -环糊精与磷脂酶结合的方法不但能有效的去除豆类蛋白中的不良风味物质,还能保留蛋白质的功能结构,将被 β -环糊精和磷脂酶处理过的豆类蛋白作为植物蛋白肉的原料,不但不会影响植物蛋白肉的品质,还有助于减少豆腥味。由于挤压的特殊性,风味物质在挤压机内保留率低,所以在挤压过程中添加风味物质来掩蔽植物蛋白肉的豆腥味似乎也不太可行。此外,可以考虑在挤压豆类蛋白过程中加入多肽和单糖,同时提高挤压温度,生成的美拉德反应产物或许可以掩蔽植物蛋白肉中的豆腥味。

4 总结与展望

风味是影响植物蛋白肉公众接受度的重要因素之一,寻找能够有效去除或掩蔽植物蛋白肉中挥发性不良风味物质的方法对于后续植物蛋白肉的推广有着重要意义。植物蛋白肉中的豆腥味产生的主要原因是 LOX 催化不饱和脂肪酸氧化,挥发性不良风味物质滞留在植物蛋白肉的主要原因是风味物质与蛋白质的相互作用。从豆类原料到豆类蛋白粉再到植物蛋白肉这一过程中,提取工艺、研磨时间、干燥方式、挤压条件以及储藏方式的不当,都会引起挥发性不良风味物质含量的增加。因此,本文从抑制 LOX 活性和降低挥发性风味物质滞留率两个角度去考虑消除或掩蔽植物蛋白肉中的豆腥味,结果发现,这些消除或掩蔽豆腥味的方法虽然各自的都有各自的优势,但是无论单独使用哪一种方法都无法完全消除挥发性不良风味物质。因此,在之后的研究中可以尝试将多个消除挥发性不良风味物质的方法联合使用,从而改善植物蛋白肉中的不良风味。

在未来关于植物蛋白肉风味的研究可以从以下几个方面入手:a.改善植物蛋白肉风味的传统方法是添加肉味香精或风味增强剂来掩蔽植物蛋白肉中的豆腥味,但在挤压过程中直接添加风味增强剂,挤出物的风味保留率不高。因此,提高风味增强剂在植物蛋白肉中的保留率以及其在后续烹饪加工的稳定性还有待进一步的研究;b.迄今为止,还没有一种有效且完善的方法将植物蛋白肉中的单一不良风味物质提取分离出来,并且对于植物蛋白肉加工与贮藏过程中风味变化的动态检测与分析,还存在着各种各样需要探究的问题,如挤压机内蛋白质与风味物质的结合机制、原料中的 LOX 在挤压机机筒内的反应情况和挥发性风味物质在植物蛋白肉中的滞留率等;c.对于电子舌、电子鼻、顶空固相微萃取和气相-质谱联用等手段测定植物蛋白肉风味方法的建立还需要进一步的考虑。

参考文献

- [1] SAINT-EVE A, IRLINGER F, C PÉNICAUD, et al. Consumer preferences for new fermented food products that mix animal and plant protein sources[J]. Food Quality and Preference, 2020, 90(1): 104117.

- [2] STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T, et al. Livestock's long shadow: Environmental issues and options[J]. *Livestocks Long Shadow Environmental Issues & Options*, 2006, 16(1): 7.
- [3] PIMENTEL D, PIMENTEL M. Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 78(3): 660s–663s.
- [4] KUMAR P, CHATLI M K, MEHTA N, et al. Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(5): 923–932.
- [5] NEMECEK T, JUNGBLUTH N, I CANALS L M, et al. Environmental impacts of food consumption and nutrition: Where are we and what is next?[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(5): 607–620.
- [6] BOUVARD V, LOOMIS D, GUYTON K Z, et al. Carcinogenicity of consumption of red and processed meat[J]. *The Lancet Oncology*, 2015, 16(16): 1599–1600.
- [7] TUSO P, STOLL S R, LI W W. A plant-based diet, atherogenesis, and coronary artery disease prevention[J]. *The Permanente Journal*, 2015, 19(1): 62.
- [8] BONNY S, GARDNER G E, PETHICK D W, et al. Artificial meat and the future of the meat industry[J]. *Animal Production Science*, 2017, 57(11): 2216–2223.
- [9] KIM K, CHOI B, LEE I, et al. Bioproduction of mushroom mycelium of *Agaricus bisporus* by commercial submerged fermentation for the production of meat analogue[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 1561–1568.
- [10] SAMARD S, GU B Y, RYU G H. Effects of extrusion types, screw speed and addition of wheat gluten on physicochemical characteristics and cooking stability of meat analogues[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(11): 4922–4931.
- [11] MARCUS, JACQUELINE B. Culinary nutrition: The science and practice of healthy cooking[J]. *International Journal of Consumer Studies*, 2013, 37(4): 465–466.
- [12] BRYANT C, SANCTORUM H. Alternative proteins, evolving attitudes: Comparing consumer attitudes to plant-based and cultured meat in belgium in two consecutive years[J]. *Appetite*, 2021, 161(11): 105161.
- [13] CHEN Y, LIANG Y, JIA F, et al. Effect of extrusion temperature on the protein aggregation of wheat gluten with the addition of peanut oil during extrusion[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 166(3): 1377–1386.
- [14] 洪滨, 解铁民, 高扬, 等. 原料体系对高水分组织蛋白纤维化结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(2): 23–27. [HONG Bin, XIE Tiemin, GAO Yang, et al. The effect of raw material system on fibrous structure for high moisture textured protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(2): 23–27.]
- [15] MA W, QI B, ROKAYYA S, et al. Conformational and functional properties of soybean proteins produced by extrusion-hydrolysis approach[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 2018(1): 1–11.
- [16] CAILLARD R, REMONDETTO G E, SUBIRADE M. Rheological investigation of soy protein hydrogels induced by maillard-type reaction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 24(1): 81–87.
- [17] WILD F, CZERNY M, JANSEN A M, et al. The evolution of a plant-based alternative to meat[J]. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 2014, 25(1): 45–49.
- [18] SEO H S, LEE S, SINGH D, et al. Evaluating the headspace volatolome, primary metabolites, and aroma characteristics of koji fermented with *Bacillus amyloliquefaciens* and *Aspergillus oryzae* [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2018, 28(8): 1260–1269.
- [19] SAMARD S, RYU G H. A comparison of physicochemical characteristics, texture, and structure of meat analogue and meats [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6): 2708–2715.
- [20] ZHANG J, LIU L, LIU H, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(20): 3267–3280.
- [21] PALANISAMY M, TÖPFL S, AGANOVIC K, et al. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues[J]. *LWT*, 2018, 87(2): 546–552.
- [22] ALAM M S, KAUR J, KHAIRA H, et al. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(3): 445–473.
- [23] ZHANG T, DOU W, ZHANG X, et al. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109(5): 207–210.
- [24] BRISHTI F H, YEA C S, MUHAMMAD K, et al. Texturized mung bean protein as a sustainable food source: Effects of extrusion on its physical, textural and protein quality[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 67(3): 102591.
- [25] MURILLO J L S, OSEN R, HIERMAIER S, et al. Towards understanding the mechanism of fibrous texture formation during high-moisture extrusion of meat substitutes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 242(11): 8–20.
- [26] KYRIAKOPOULOU K, DEKKERS B, VAN DER GOOT A J. Plant-based meat analogues[M]. Sustainable Meat Production and Processing, Academic Press, 2019: 103–126.
- [27] 时玉强, 刘锡潜, 李顺秀, 等. 基于气相离子迁移谱的大豆分离蛋白风味控制研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 355–363. [SHI Yuqiang, LIU Xiqian, LI Shunxiu, et al. Flavor control of soy protein isolate by GC-IMS[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 355–363.]
- [28] ROLAND, POUVREAU L, CURRAN J, et al. Flavor aspects of pulse ingredients[J]. *Cereal Chemistry*, 2017, 94(1): 58–65.
- [29] TRIKUSUMA M, PARAVISINI L, PETERSON D G. Identification of aroma compounds in pea protein UHT beverages[J]. *Food Chemistry*, 2019, 312(15): 126082.
- [30] LÜ Y C, SONG H L, LI X, et al. Influence of blanching and grinding process with hot water on beany and non-beany flavor in soymilk[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(1): S20–S25.
- [31] YU H, LIU R, HU Y, et al. Flavor profiles of soymilk pro-

- cessed with four different processing technologies and 26 soybean cultivars grown in China[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(3): S2887–S2898.
- [32] MIN S, YU Y, YOO S, et al. Effect of soybean varieties and growing locations on the flavor of soymilk[J]. Journal of Food Science, 2010, 70(1): 1–11.
- [33] 施小迪. 豆乳及豆乳发酵液不良风味的形成及改善途径研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017. [SHI Xiaodi. Study on the formation and improving methods for off-flavor of soymilk and soy milk fermented liquid[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.]
- [34] GU Z, JIANG H, ZHA F, et al. Toward a comprehensive understanding of ultracentrifugal milling on the physicochemical properties and aromatic profile of yellow pea flour[J]. Food Chemistry, 2021, 345(4): 128760.
- [35] GWIAZDA S, RUTKOWSKI A, KOCON J. Some functional properties of pea and soy bean protein preparations[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2010, 23(7): 681–686.
- [36] TRINDLER C, KOPF-BOLANZ K A, DENKEL C. Aroma of peas, its constituents and reduction strategies—effects from breeding to processing[J]. Food Chemistry, 2021, 376(5): 131892.
- [37] VIANA L, ENGLISH M. The application of chromatography in the study of off-flavour compounds in pulses and pulse by-products[J]. LWT, 2021, 150(8): 111981.
- [38] KOU X, GAO J, XUE Z, et al. Purification and identification of antioxidant peptides from chickpea (*Cicer Arietinum* L.) albumin hydrolysates[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50(2): 591–598.
- [39] XU M, JIN Z, GU Z, et al. Changes in odor characteristics of pulse protein isolates from germinated chickpea, lentil, and yellow pea: Role of lipoxygenase and free radicals[J]. Food Chemistry, 2020, 314(7): 126184.
- [40] 田怀香, 何晓薇, 李立, 等. 豆浆中豆腥味影响因素及消除方法的研究进展[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 340–347. [TIAN Huaixiang, HE Xiaowei, LI Li, et al. Research progress about the affecting factors and eliminating methods of beany flavor in soymilk [J]. Modern Food Technology, 2021, 37(10): 340–347.]
- [41] 曾祥博, 王歲, 张可心, 等. 无腥豆浆风味品质影响因素及常用加工技术研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(9): 307–311.
- [42] ZENG Xiangbo, WANG Wei, ZHANG Kexin, et al. Research developments on influencing factors of flavor quality and processing technology of non-beany soymilk[J]. The Food Industry, 2019, 40(9): 307–311.]
- [43] 李春焕, 王晓琴, 曾秋梅. 植物油脂氧化过程及机理、检测技术以及影响因素研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(9): 277–284. [LI Chunhuan, WANG Xiaoqin, ZENG Qiuyue. Research progress of the process and mechanism, determination and influential factors of vegetable lipid oxidation[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(9): 277–284.]
- [44] CHEDEA V S, PINTEA A, BUNEA A, et al. Physalis alkekengi carotenoidic extract inhibitor of soybean lipoxygenase-1 activity[J]. BioMed Research International, 2014, 9(7): 589168.
- [45] MURAT C, GOURRAT K, JEROSCH H, et al. Analytical comparison and sensory representativity of safe, spme, and purge and trap extracts of volatile compounds from pea flour[J]. Food Chem, 2012, 135(3): 913–920.
- [46] WANG K, ARNTFIELD S D. Binding of carbonyl flavours to canola, pea and wheat proteins using GC/MS approach[J]. Food Chemistry, 2014, 157(15): 364–372.
- [47] JOSHI V K, KUMAR S. Meat analogues: Plant based alternatives to meat products—a review[J]. International Journal of Food and Fermentation Technology, 2015, 5(2): 107–119.
- [48] SUPPATORASATIT I, CADWALLADER K R. Effect of enzymatic deamidation of soy protein by protein–glutaminase on the flavor-binding properties of the protein under aqueous conditions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(32): 7817–7823.
- [49] ZHOU Q, LEE S Y, CADWALLADER K R. Inverse gas chromatographic evaluation of the influence of soy protein on the binding of selected butter flavor compounds in a wheat soda cracker system[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(15): 5516–5520.
- [50] WANG K, ARNTFIELD S D. Effect of protein-flavour binding on flavour delivery and protein functional properties: A special emphasis on plant-based proteins[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2017, 32(2): 92–101.
- [51] 杨叶波, 蔡培培, 何文森. 大豆蛋白质的提取技术的研究进展[J]. 广州化工, 2015, 43(9): 26–27. [YANG Yebo, CAI Peipei, HE Vinson. Research progress on extraction technology of soybean protein[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(9): 26–27.]
- [52] 王丽娟, 吴娜娜, 杨晓泉. 不同方法制备的大豆蛋白感官品质比较[J]. 中国油脂, 2010, 35(7): 24–27. [WANG Lijuan, WU Nana, YANG Xiaoquan. Comparison of sensory character on soy protein prepared from different methods[J]. China Oils and Fats, 2010, 35(7): 24–27.]
- [53] ZHAO X, SUN L, ZHANG X, et al. Effects of ultrafine grinding time on the functional and flavor properties of soybean protein isolate[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2020, 19690(2): 111345.
- [54] DAMODARAN S, ARORA A. Off-flavor precursors in soy protein isolate and novel strategies for their removal[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2013, 4(1): 327–346.
- [55] 李慧勤, 彭见林, 赵国华. 不同干燥方式的豆渣香气成分的顶空固相微萃取-气相色谱-质谱分析[J]. 食品科学, 2012, 35(22): 167–172. [LI Huiqin, PENG Jianlin, ZHAO Guohua. Effect of different drying methods on aromatic composition of okara as determined by headspace SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2012, 35(22): 167–172.]
- [56] MA Z, BOYE J I, AZARNIA S, et al. Volatile flavor profile of saskatchewan grown pulses as affected by different thermal processing treatments[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(10): 2251–2271.

- [57] RACKIS J J. Spectrophotometric method for determination of lipoxidase activity[J]. Am Oil Chem Soc, 2006, 56(11): 262–268.
- [58] ZHANG Y, GUO S, LIU Z, et al. Off-flavor related volatiles in soymilk as affected by soybean variety, grinding, and heat-processing methods[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(30): 7457–7462.
- [59] YUAN S, CHANG S K C. Selected odor compounds in soymilk as affected by chemical composition and lipoxygenases in five soybean materials[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(2): 426–431.
- [60] 寻崇荣, 薛洪飞, 刘宝华, 等. 高湿挤压技术制备持香型仿肉制品工艺 [J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 292–298. [XUN Chongrong, XUE Hongfei, LIU Baohua, et al. Processing of flavored meat analogues by high-moisture extrusion [J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 292–298.]
- [61] SUN C, CADWALLADER K R, KIM H. Comparison of key aroma components between soymilks prepared by cold and hot grinding methods[J]. Acs Symposium, 2010, 1059(11): 361–373.
- [62] JIANG Z, PULKKINEN M, WANG Y, et al. Faba bean flavour and technological property improvement by thermal pre-treatments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68(2): 295–305.
- [63] SHUANG BI, XINXING XU, DONGSHENG LUO, et al. Characterization of key aroma compounds in raw and roasted peas (*Pisum sativum* L.) by application of instrumental and sensory techniques[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(9): 2718–2727.
- [64] PATTEE H E, SALUNKHE D K, SATHE S K, et al. Legume lipids[J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 1982, 17(2): 97–139.
- [65] MEHLE H, PARAVISINI L, PETERSON D G. Impact of temperature and water activity on the aroma composition and flavor stability of pea (*Pisum sativum*) protein isolates during storage[J]. Food & Function, 2020, 11(9): 8309–8319.
- [66] GÖKMEN V, BAHÇECİ K S, SERPEN A, et al. Study of lipoxygenase and peroxidase as blanching indicator enzymes in peas: Change of enzyme activity, ascorbic acid and chlorophylls during frozen storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2005, 38(8): 903–908.
- [67] 杜雅荣, 刘霞, 李喜宏, 等. 低温储藏大豆对其所制豆浆腥味物质调控效应研究 [J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(10): 20–25. [DU Yarong, LIU Xia, LI Xihong, et al. Study on the effect of cryogenic storage on regulation of soybean milk odor substances [J]. *Cereals & Oils*, 2017, 30(10): 20–25.]
- [68] ALHENDI A, YANG W, SARNOSKI P J. The effect of solution properties on the photochemical ability of pulsed light to inactivate soybean lipoxygenase[J]. International Journal of Food Engineering, 2018, 14(5): 5–6.
- [69] 付春旭. 高蛋白无腥味大豆绥无腥豆 2 号的选育与推广 [J]. 黑龙江农业科学, 2018, 7(1): 141–142. [FU Chunxu. Breeding and popularization of a soybean cultivar suiwuxingdou 2 with high protein and no off-flavor [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2018, 7(1): 141–142.]
- [70] 钱海峰, 周惠明. 大豆制品腥味控制研究进展 [J]. *粮食与油脂*, 2003, 14(8): 18–21. [QIAN Haifeng, ZHOU Huiming. Research development on control of beany flavour in soybean products [J]. *Cereals & Oils*, 2003, 14(8): 18–21.]
- [71] 王丹, 付永平, 王丕武, 等. 大豆胰蛋白酶抑制剂和脂肪氧化酶基因双价 RNAi 表达载体的改造及转化 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2012, 40(12): 85–89. [WANG Dan, FU Yongping, WANG Piwu, et al. Construction and transformation of RNAi plant expression vector of lipoxygenase and kunitz trypsin inhibitor genes from soybean [J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2012, 40(12): 85–89.]
- [72] YANG A, SMYTH H, CHALIHA M, et al. Sensory quality of soymilk and tofu from soybeans lacking lipoxygenases[J]. Food Science & Nutrition, 2016, 4(2): 207–215.
- [73] ESTEVES E A, MARTINO H S D, OLIVEIRA F C E, et al. Chemical composition of a soybean cultivar lacking lipoxygenases (LOX2 and LOX3)[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(1): 238–242.
- [74] MA L, LI B, F HAN, et al. Evaluation of the chemical quality traits of soybean seeds, as related to sensory attributes of soymilk[J]. *Food Chemistry*, 2015, 173(16): 694–704.
- [75] 李慧静, 周惠明, 朱科学, 等. 大豆异味去除的研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(2): 215–220. [LI Huijing, ZHOU Huiming, ZHU Kexue, et al. Research development on eliminating off-flavor of soybean [J]. *Food Research and Development*, 2012, 33(2): 215–220.]
- [76] 张岚, 于寒松, 朴春红, 等. 高湿挤压技术改善含豆渣组织蛋白不良风味的作用 [J]. *食品工业*, 2016, 37(2): 153–156. [ZHANG Lan, YU Hansong, PARK Chunhong, et al. The function on improving flavor of textured protein made from soybean dregs by high moisture extrusion [J]. *The Food Industry*, 2016, 37(2): 153–156.]
- [77] TEWARI K, KUMARI S, VINUTHA T, et al. Gamma irradiation induces reduction in the off-flavour generation in soybean through enhancement of its antioxidant potential[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, 303(3): 2041–2051.
- [78] LI Y Q, CHEN Q, LIU X H, et al. Inactivation of soybean lipoxygenase in soymilk by pulsed electric fields[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(2): 408–414.
- [79] IASSONOVA D R, JOHNSON L A, HAMMOND E G, et al. Evidence of an enzymatic source of off-flavors in “Lipoxygenase-Null” soybeans[J]. *Journal of the American Oil Chemists’ Society*, 2009, 86(1): 59–64.
- [80] SZCZYGIEL E J, HARTE J B, STRASBURG G M, et al. Consumer acceptance and aroma characterization of navy bean (*Phaseolus vulgaris*) powders prepared by extrusion and conventional processing methods[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(12): 4142–4150.
- [81] MILANI T M G, MENIS M E C, JORDANO A, et al. Pre-extrusion aromatization of a soy protein isolate using volatile compounds and flavor enhancers: Effects on physical characteristics, volatile retention and sensory characteristics of extrudates[J]. *Food Research International*, 2014, 62(8): 375–381.

- [82] MENIS M E C, MILANI T M G, JORDANO A, et al. Extrusion of flavored corn grits: Structural characteristics, volatile compounds retention and sensory acceptability[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 54(2): 434–439.
- [83] 关丽娜, 刘艳香, 刘明, 等. 挤压温度对豌豆粉特征风味化合物的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 269–278. [GUAN Lina, LIU Yanxiang, LIU Ming, et al. Effect of extrusion temperature on characteristic flavor compounds in pea flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(12): 269–278.]
- [84] SANDRA E, WIEBKE M, ANN-KATHRIN N, et al. Influence of protein extraction and texturization on odor-active compounds of pea proteins[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 27(7): 2–9.
- [85] GUO Z, TENG F, HUANG Z, et al. Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105(5–6): 105752.
- [86] 寻崇荣, 薛洪飞, 江连洲, 等. 螺杆转速对持香型仿肉制品结构及挥发性成分保留率的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(7): 150–155. [XUN Chongrong, XUE Hongfei, JIANG Lianzhou, et al. Effect of screw rotation speed on structure and volatile component retention rate of flavored meat analogues produced by an extruder[J]. *Food Science*, 2019, 40(7): 150–155.]
- [87] WANG X, HO C T, SHAHIDI F. Flavor components of fats and oils[J]. *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 2005(7): 1–25.
- [88] BADER S, OVIEDO J P, PICKARDT C, et al. Influence of different organic solvents on the functional and sensory properties of lupin (*Lupinus angustifolius* L.) proteins[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(6): 1396–1404.
- [89] CCA B, AKS A, RG C, et al. Reduction of off-flavours and the impact on the functionalities of lentil protein isolate by acetone, ethanol, and isopropanol treatments[J]. *Food Chemistry*, 2019, 277(5): 84–95.
- [90] WANG Y, GULDIKEN B, TULBEK M, et al. Impact of alcohol washing on the flavour profiles, functionality and protein quality of air classified pea protein enriched flour[J]. *Food Research International*, 2020, 132(7): 109085.
- [91] HENG L, VINCKEN J P, VAN KONINGSVELD G, et al. Bitterness of saponins and their content in dry peas[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(8): 1225–1231.
- [92] SETHI S, TYAGI S K, ANURAG R K. Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: A review [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(9): 3408–3423.
- [93] 张平安, 乔明武, 张建威, 等. 用小麦芽有效成分消除豆腥味的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2009(3): 145–148. [ZHANG Pingan, QIAO Mingwu, ZHANG Jianwei, et al. The study of wheat malt eliminating soybean odor[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2009(3): 145–148.]
- [94] SONG D, CHANG S K C, IBRAHIM S A. Descriptive sensory characteristics of no-flatulence pinto bean[J]. *Journal of Food Quality*, 2009, 32(6): 775–792.
- [95] SIX D A, DENNIS E A. The expanding superfamily of phospholipase A2 enzymes: Classification and characterization[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 2000, 1488(2): 1–19.
- [96] ARORA A, DAMODARAN S. Removal of soy protein-bound phospholipids by a combination of sonication, β -cyclodextrin, and phospholipase A2 treatments[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 1007–1013.
- [97] D ZHU, DAMODARAN S. Removal of off-flavour-causing precursors in soy protein by concurrent treatment with phospholipase A2 and cyclodextrins[J]. *Food Chemistry*, 2018, 264(30): 319–325.
- [98] PALKERT P E, FAGERSON I S. Determination of flavor retention in pre-extrusion flavored textured soy protein[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 45(3): 526–528.
- [99] YULIANI S, TORLEY P J, D' ARCY B, et al. Effect of extrusion parameters on flavour retention, functional and physical properties of mixtures of starch and D-limonene encapsulated in milk protein[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2006, 41(s2): 83–94.
- [100] YU M, HE S, TANG M, et al. Antioxidant activity and sensory characteristics of maillard reaction products derived from different peptide fractions of soybean meal hydrolysate[J]. *Food Chemistry*, 2018, 243(15): 249–257.
- [101] ZHANG Z, ELFALLEH W, HE S, et al. Heating and cysteine effect on physicochemical and flavor properties of soybean peptide maillard reaction products[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120(9): 2137–2146.
- [102] HABINSHUTI I, CHEN X, YU J, et al. Antimicrobial, antioxidant and sensory properties of maillard reaction products (MRPs) derived from sunflower, soybean and corn meal hydrolysates[J]. *LWT*, 2019, 101(5): 694–702.