

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

曾艳¹, 郝学财², 董婷³, 孙媛霞^{1,*}

(1. 中国科学院天津工业生物技术研究所, 天津 300308;

2. 天津春发生物科技集团有限公司, 天津 300300;

3. 天津美康食品有限公司, 天津 300300)

摘要:植物蛋白肉以植物蛋白质为主要原料,通过重塑蛋白质的解离聚合行为形成类肉纤维结构,同时添加油脂、色素、粘合剂等非动物来源食品配料,加工定制出接近真实动物肉的形态色泽与风味口感。由于能够有效解决肉类供应不足问题,食品安全性高、生产方式绿色可持续,植物蛋白肉作为肉类替代食品发展迅猛,受到食品工业的广泛关注。本文将对植物蛋白肉所用的蛋白质等原料组成、挤压法等加工工艺开发以及成型产品的质构特性与营养组分研究进行综述,以期为国内植物蛋白肉的生产研发与应用推广提供参考。

关键词:植物蛋白肉,原料组成,加工工艺,质构特性,营养特性

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

ZENG Yan¹, HAO Xuecai², DONG Ting³, SUN Yuanxia^{1,*}

(1. Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China;

2. Tianjin Chunfa Bio-Technology Group Co., Ltd, Tianjin 300300, China;

3. Tianjin Meikang Foods Co., Ltd, Tianjin 300300, China)

Abstract: Plant based meat are made from plant-based proteins as the main raw material by reshaping the dissociation and polymerization behavior of protein to induce the formation of meat-like fiber texture, and fat/oil, pigment and other non-animal food ingredients are added during the process to resemble the appearance, color, flavor, and texture of animal meat. Due to its potential to solve the problem of insufficient meat supply, and high food safety as well as green and sustainable production mode, plant based meat has been developed rapidly as the substitute of meat in recent years, and has received a lot of attentions from food industry. This paper reviews the development of proteins and other raw materials, extrusion and other processing technology in the production of plant based meat, as well as the research on the texture characteristics and nutritional composition of modern plant based meat products, in aim to provide reference for the further production, development and application of modern meat analogues.

Key words: Meat analogues; material composition; processing technology; texture characteristics; nutritional components

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)03-0338-09

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020030365

引文格式: 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 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[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 338-345, 350.

ZENG Yan, HAO Xuecai, DONG Ting, et al. Research Progress on Raw Material Development, Processing Technology and Nutritional Properties of Plant Based Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 338-345, 350. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.com>

肉类是人类摄取蛋白质、脂肪、矿物质和 B 族维生素的重要及良好来源。随着生活水平的提高, 人类对肉类消费需求在不断增加。从 1961 年到 2011

年, 全球人均肉类消费量从 23 千克/人/年增加到 40 千克/人/年^[1]。预计至 2050 年全球人口将超过 90 亿, 而肉类需求量将增至 4.64 亿吨^[2]。动物饲养与

收稿日期: 2020-03-29

作者简介: 曾艳(1982-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 功能食品配料生物制造, E-mail: zeng_y@tib.cas.cn.

* 通信作者: 孙媛霞(1963-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品配料生物制造, E-mail: sun_yx@tib.cas.cn.

基金项目: 天津市合成生物技术创新能力提升行动项目 TSBICIP-KJGG-004.

肉类生产会占用大量的土地、粮食和水,产生大量的粪便、污水与二氧化碳,加剧环境污染与温室效应。以牛肉生产为例,生产 1 kg 牛肉需占用约 190 m² 土地,消耗 6~8 kg 谷物饲料和 15~16 m³ 水,同时产生至少 14~19 kg 二氧化碳^[3-5]。同时,医学研究证实肉类特别是红肉的过度摄入,会造成高血压、高血脂与心脑血管病等隐患^[6],而畜牧业的抗生素滥用会导致耐药菌蔓延,威胁公共卫生和生态安全^[7]。因此,为解决人类对肉类的需求和由传统养殖业带来的环境资源压力,减少肉类过度摄入导致的健康问题,提高国民身体健康水平,非动物养殖来源蛋白质的开发受到广泛关注,食品行业的研发人员致力探索通过细胞培育或植物加工生产出肉类替代食品。

2013 年,荷兰马斯特里赫特大学 Mark Post 教授从牛细胞组织中分离出干细胞进行体外培养,让细胞通过增殖生长分化作用依托于胶原蛋白支架形成肌肉纤维,进而形成肌肉团块,生产出第一块细胞培育的人造牛肉汉堡,引起世界轰动^[8]。然而,细胞培育肉通常需要使用价格昂贵的胎牛血清培养基,培养过程容易受到酵母或霉菌等杂菌污染,操作需要严格无菌,并保证适宜的 pH、渗透压、温度以及二氧化碳浓度,而且,有限的细胞分裂速度导致细胞培育肉无法显著提高产量,此外,细胞培养肉也面临消费者认可与监管法规许可的考验^[9]。与此对比,植物蛋白肉以植物蛋白为主要原料,经过高温高压工艺提高蛋白质的类肉纤维结构组成,并添加油脂、色素等非动物性食品配料,使其形态口感风味更接近真肉,具有成本相对低廉、食品安全系数高、容易批量生产、可以满足素食消费需求的特点,被认为是目前更具市场潜力的肉类替代食品生产方式之一^[10-12]。

人类食用植物蛋白质的历史悠久,植物蛋白质在世界饮食文化结构中占有重要地位。如由大豆加工而来的中国食品豆腐流传至今已经有 2100 多年,发源于印尼与日本的大豆发酵食品 tempeh 与纳豆、流行于阿拉伯地区的油炸鹰嘴豆丸子 falafel 广为人知^[13]。然而,尽管中国国民对植物蛋白素肉的概念并不陌生,从最早的豆腐到后续由豆制品衍生而来的素鸡、素鸭、素鱼以及面筋、腐竹等都是在中国人舌尖上容易出现的替肉食品,植物蛋白肉与传统的植物蛋白素肉依旧有所区别。其一,虽然在宗教信仰引导下传统的植物蛋白素肉流传于东方国家,而植物蛋白肉的兴起却源于过去几十年内西方国家对植物蛋白质经济价值与营养功能的认知普及;其二,传统的植物蛋白素肉以豆制品为原料,制作依赖于厨房式运作,对工人的烹饪专业技巧要求高,研发产品以中式食物为主,而植物蛋白肉的原料不再局限于豆类,开发了菌类、藻类等多元化食材,而且加工工艺能够实现高度机械化与工业规模化,产品更符合西方消费理念需求;其三,传统的植物蛋白素肉对动物肉的模拟主要停留在形的层面,而植物蛋白肉在质地特性、风味口感与营养功能上研究深入,对动物肉的仿真模拟发生了质的变化。

近年来植物蛋白肉产业扩张势头凶猛。据市场研究公司 Mordor Intelligence 的报告,现代植物蛋白

肉市场在 2019~2025 年内将以 8.6% 的年复合增长率增速,亚太地区市场增速最快,欧洲则成为最大市场。预计至 2025 年,植物蛋白肉行业总值将达 212.3 亿美元^[14]。欧美发达国家的多家食品公司已经提前布局实现植物蛋白肉的市场化,不仅获得了可观的风险投资,而且拥有众多核心专利技术,推出了多款产品。然而,国内的植物蛋白肉产业才刚起步,企业与市场分散、产品配方及加工技术有待加强。

鉴于国内的植物蛋白肉产业发展落后于欧美,而国内缺少对植物蛋白肉的原料筛选、加工工艺以及产品质构营养特性等方面研究的系统总结,本文将对国内外植物蛋白肉相关研究进展进行综述,以为国内植物蛋白肉的研发生产与应用推广提供参考。

1 植物蛋白肉原料

按重量比例计,植物蛋白肉通常由 50%~80% 水分、10%~25% 植物组织化蛋白、4%~20% 植物非组织化蛋白、3%~10% 的风味着色物质、0~15% 的油脂以及 1%~5% 的粘合剂组成^[15]。其中,高含量水分不仅可以提供类肉多汁感,还可以在加工过程中发挥降粘、增塑、产生气化热及作为反应溶剂等作用。植物蛋白质在加工过程中的温度、剪切力、压力和水共同作用下,从天然的球状聚集态重组转变为具有类似动物肉纤维结构和咀嚼感的组织化植物蛋白,构架了植物蛋白肉产品的骨架结构。而非组织化蛋白可与多糖等粘合剂协同作用,提高组织化植物蛋白骨架的持水凝胶能力,促进类肉有序组织结构稳定形成。风味着色物质与油脂主要用于提升植物蛋白肉类肉外观与香气风味的像真性。

1.1 蛋白质

蛋白质的溶解性、持水性、持油性、乳化性、发泡性、凝胶性等,是植物蛋白肉模拟动物肉形成类肉纤维结构所必需的功能特性。油料蛋白中的大豆蛋白(包括脱脂大豆粕、浓缩大豆蛋白、分离大豆蛋白、大豆组织化蛋白和水解大豆蛋白),氨基酸组成均衡,价格相对低廉,具有良好的溶解性、持水性、乳化性、凝胶性,是植物蛋白肉最常见的蛋白质原料^[15-17]。来自谷物蛋白的小麦麦麸蛋白具有良好的吸水性、黏弹性、薄膜成型性、热固性,也是植物蛋白肉常见的原料,其发生水合作用可形成由二硫键维持的三维蛋白质网络,增加产品的黏弹性和硬度,提高色泽稳定性、出汁率和保水性^[18]。近年来,尽管豆类蛋白中的豌豆蛋白热诱导胶凝能力弱于大豆蛋白,却由于非转基因、非过敏源、不含雌激素、生物利用度高等优点,被视为是大豆蛋白更好的替代品,备受植物蛋白肉市场追捧。比尔·盖茨投资的美国人造肉公司 Beyond Meat 公司推出以豌豆蛋白为主要原料的植物蛋白肉汉堡^[19-21]。此外,由于蛋白质的化学组成、氨基酸序列和高级结构以及 pH、温度、离子强度等环境因素变化对蛋白质的物理性能具有重要影响,不同来源的植物蛋白质,包括花生蛋白^[22-23]、油菜籽蛋白^[24]等油料蛋白,羽扇豆蛋白^[25]、鹰嘴豆^[26]等豆类蛋白,大米蛋白、玉米蛋白^[27-28]等谷物蛋白以及镰孢

霉^[29]、侧耳^[30]、双孢蘑菇^[31]等菌类蛋白和原始小球藻^[32]、螺旋藻^[33]等藻类蛋白也被尝试应用于植物蛋白肉的制作,以提高产品品质。

1.2 油脂及风味物质

油脂是直接影响动物肉多汁、柔嫩和风味释放的重要属性,也是植物蛋白肉的必需原料,不仅如此,油脂能减少加工过程中物料与设备的摩擦系数,改善物料的流动性。然而,油脂用量过高会导致物料在强烈剪切下发生滑移,挤出物无法稳定成型^[34]。因此,植物蛋白肉配方中的油脂用量会控制在15%以下。目前已报道用于植物蛋白肉的油脂包括葵花籽油、菜籽油、玉米油、棕榈油、椰子油和大豆油等^[12]。油脂在高温高压下氧化降解产生的醛、酮、醇、酯等挥发性物质,是参与肉类特征风味形成的重要成分。除脂质氧化外,脂质氧化降解产物参与的Maillard反应也是肉类特征风味产生的重要途径。因此,在植物蛋白肉的加工过程中,除直接添加Maillard反应类型的肉类香精外^[35-36],还可添加还原糖、氨基酸、硫胺素和核苷酸等肉类香气前体物质,在高温下进行氧化降解与Maillard反应,形成肉类特征风味物质^[37]。此外,为掩盖大豆蛋白的腥味和苦涩味,植物蛋白肉制品还会加入大蒜、洋葱、芹菜、辣椒以及鼠尾草等香辛料。

1.3 着色剂

动物肉的肉色主要由肌红蛋白决定,其所含血红素铁离子的价位、配体以及配体的空间位阻是肉色变化的关键所在。不仅如此,由于血红素铁能够催化加速脂类氧化,促进肉制品挥发性风味物质生成,而且,肌红蛋白粘胶性强、能够增加组织致密性,提高韧性口感,呈现动物肉肉色、肉味以及肉感的肌红蛋白替代品成为最引人关注的植物蛋白肉原料。含有血红素铁的大豆血红蛋白虽然氨基酸序列与肌红蛋白差异大, α 、 β 链的三级结构却与肌红蛋白相似,有与肌红蛋白相近的食品化学性质^[38],美国植物蛋白肉龙头企业Impossible Foods公司通过基因工程改造毕赤酵母发酵生产大豆血红蛋白(美国专利公开号:US9808029B2),经美国食品和药物管理局FDA批准作为着色剂用于旗下产品。目前在食品安全菌株中导入生物合成基因生产动物血红蛋白的研究已见报道,同时,有关科研机构也开展了借助合成生物学技术制造动物肌红蛋白并应用于细胞培育肉或植物蛋白肉的研究。

除大豆血红蛋白外,甜菜提取物、焦糖色素、胡萝卜素色素、番茄酱、石榴果粉等也被用于植物蛋白肉产品着色,如红甜菜根汁提取物拥有良好的水相分散性,能有效模拟熟、熏、半干和发酵腌肉等动物肉类加工产品的色泽^[39],已作为色素用于Beyond Meat公司的植物蛋白肉汉堡上。色素的应用可能影响植物蛋白肉制品的质构性能。Singh等^[40]发现甜菜粉不仅增加了玉米蛋白挤压物的红色色泽,而且提高了挤压物的密度、硬度和膳食纤维含量,同时降低了挤压物的吸水性、水溶性指数、膨胀率和吸油能力。由于植物蛋白肉的纤维结构稳定性差,易受pH影

响,选择着色剂时需要考虑原料的pH适配性与固色稳定性。

1.4 粘合剂

植物蛋白肉是以植物组织化蛋白、脂肪风味物质以及水为主体形成的高水分三维聚合物凝胶网络,能在压力下抵抗流动并保留适当机械强度,但一旦遭到破坏,结构所结合的水分、脂肪风味物质会快速流失直接影响植物蛋白肉的口感。因此,具有弱分子间力与共价键交联作用的粘合剂对维持植物蛋白肉微观结构意义重大。除持水、持油、凝胶性能良好的蛋白质如小麦麦麸蛋白、大豆分离蛋白、大豆浓缩蛋白外,羧甲基纤维素、阿拉伯胶、黄原胶、卡拉胶、褐藻酸钠、魔芋葡甘聚糖和变性淀粉等多糖类物质也能改善油脂与风味物质在蛋白质凝胶网络内部的包埋分布,减少油脂聚集絮凝,粘合原料形成更加紧凑稳定的各向异性基质,增加风味物质释放位阻效应^[41-42]。研究发现0.1%褐藻酸钠的加入提高了花生蛋白质在高水分挤压下的纤维化程度,挤出物的氢键作用与疏水性相互作用增强,胶体结构更为紧密均一,弹性、拉伸性、硬度以及咀嚼感都有大幅度提升^[43]。粘合剂的弱分子作用力包括氢键、静电吸引、范德瓦耳力和疏水性相互作用等,共价键交联则主要来自蛋白质分子间的二硫键交联与在转谷氨酰胺酶催化下由蛋白质赖氨酸和谷氨酸相互作用形成 ϵ -(γ -谷氨酰胺基)赖氨酸键交联^[44]。因此,转谷氨酰胺酶等酶类蛋白交联剂也可用作植物蛋白肉粘合剂。迄今已有借助合成生物学策略通过微生物发酵生产纤维素、褐藻酸钠、甲壳素、壳聚糖等粘合剂的报道^[45],而通过蛋白质工程技术提高转谷氨酰胺酶、漆酶等蛋白交联剂酶学性能的研究也在不断深入。鉴于与传统农业生产与化学制造工业相比,生物制造技术在土地利用、能源消耗以及原料转化方面具有强大优势,来源于生物制造符合食品安全法律法规要求的新颖粘合剂在植物蛋白肉上的应用大有潜力可挖。

2 植物蛋白肉加工

目前,能有效形成纤维状蛋白质结构、规模化生产可行性高的植物蛋白肉加工工艺主要包括纺丝法、挤压法和剪切法。

2.1 纺丝法

纺丝法制造植物蛋白肉可分为湿法纺丝技术和静电纺丝技术。在湿法纺丝中,高纯度的植物蛋白与粘合剂混合溶解在稀碱溶液中形成“纺丝液”,经多孔板或喷嘴挤压到酸性盐溶液后凝固拉伸纤维化成型^[46]。静电纺丝利用高压静电场对植物蛋白质高分子溶液或熔体的击穿作用,在喷射装置和接收装置间施加高压静电场,喷射装置前端的纺丝液滴形成圆锥形泰勒锥,并向接收装置方向拉伸形成射流,溶剂挥发后最终在接收装置上形成无纺状态的蛋白质纳米纤维^[47]。

湿法纺丝需要使用大量酸和碱,化学污染大,食用安全性低,在植物蛋白肉的生产上已被逐步淘汰。静电纺丝要求植物蛋白质原料不仅溶解度高、粘度高、电导率高、表面张力高,而且需要在溶解状态下

以无规卷曲形态存在,以促使喷丝过程中原料相互作用发生缠绕。然而,植物蛋白肉的常见原料豆类蛋白主要以球蛋白形式存在,在水溶液中容易凝聚。虽然化学改性或添加助溶剂能够提高静电纺丝原料性能,在入口食品制造上却并不适用。目前,只有在乙醇水溶液中以无规卷曲形态存在的玉米醇溶蛋白^[48]以及加热状态下成无规卷曲形态的明胶、乳清蛋白^[49]被发现具有静电纺丝加工植物蛋白肉的可能,但明胶或乳清蛋白是否符合植物蛋白肉生产的原料许可还待商榷。由此可见,受原料约束,静电纺丝在植物蛋白肉上的应用发展空间有限。

2.2 挤压法

挤压加工集物料的混合、均质、熟化、成型等多个单元操作于一体,植物蛋白肉原料通过螺杆输送压缩,在加热的机筒中受到剪切力和摩擦力双重作用形成熔融流体,维持蛋白质高级结构的氢键、范德华力、离子键和二硫键遭到破坏,蛋白质高度规则的空间结构瓦解,肽链松散伸展呈相对线性,随着剪切不断进行,不断增多的呈线性蛋白质分子链相互靠近吸引;当物料被挤压经过模头时,在定向流动作用下产生一定程度的取向排列,形成纤维状组织结构。挤压加工具有原料适用性宽、连续性较好、工艺集成性高、无污染物排放等特点,是目前植物蛋白肉最常见的生产加工方式。

根据物料含水率不同,挤压工艺可分为物料水分含量低于40%的低水分挤压和物料水分含量高于40%高水分挤压,其中,始于20世纪60年代的低水分挤压技术对原料的蛋白质含量要求不高,设备可为单螺杆或双螺杆挤压机,机筒的温度设置由喂料端到模头端依次为低-高-高,湿物料以高温状态流经模头,物料水分瞬间变成热蒸汽导致挤出物发生膨胀,制得的产品含水量低,结构呈膨化海绵状,大小、形状和风味多样,口感松软,主要用于植物蛋白肉的香肠和肉饼制作,使用前需要复水处理。始于20世纪80年代的高水分挤压技术需采用带有冷却模具的双螺杆挤压机,要求原料中的蛋白质含量在60%以上,机筒的温度设置由喂料端到模头端依次为低-高-低,挤出物中的水分得以保留,制品组织化程度高、富有弹性和韧性,更接近动物肉制品,可直接食用^[18,50-51]。模具设计以及操作参数如机筒温度、物料含水率、喂料速度、螺杆转速等会在蛋白质原料特性的基础上对植物蛋白肉挤压成品的色泽、外观、质构造成重要影响^[52-55]。Palanisamy等^[56]发现水分是影响乳扇豆挤压形成蛋白质纤维结构的关键因素。含水率低于40%时,乳扇豆蛋白的水化作用不完全,无法有效交联。含水率高于68%时,蛋白变性程度减少,物料粘度减小,蛋白质的相互作用与交联反应程度相应降低。挤压转速显著影响挤出物的颜色呈现效果,高转速能够提高挤出物的持水性能。由于能耗低、制品性能好,高水分挤压工技术在植物蛋白肉生产上的应用潜力获得行业普遍认同。

2.3 热剪切法

植物蛋白肉的热剪切法加工技术与所需设备由

荷兰瓦赫宁根大学的 Atze Jan van der Goot 教授发明改进。热剪切法工艺借用剪切流概念,设备核心主体已经从小型的嵌套圆锥“*Shear Cell*”发展到适合规模生产的“*Couette Cell*”,后者由两个嵌套圆筒组成,外层圆筒保持固定不动,内层圆筒可以匀速旋转。将植物蛋白原料和水混合加入所谓的“剪切区”即圆筒间隙后,通过调节圆筒转速与温度,控制加工时间,即可在剪切力和加热的简单组合下将植物蛋白质原料加工为均一、分层的纤维结构^[57-58]。

Atze Jan van der Goot 团队使用 *Couette Cell*,在温度 90~110 °C、内圆筒转速 5~50 r/min、作用时长 5~25 min 下剪切大豆分离蛋白与小麦麦麸蛋白的混合原料,获得了微观尺度各向异性的多层纤维状植物蛋白肉^[60]。此外,他们还应用 *Couette Cell* 成功加工了果胶与大豆分离蛋白混合物^[59]以及大豆浓缩蛋白^[61]的纤维结构,发现在剪切法中高温可以降低混合原料粘度,加速蛋白质伸展,直接改变混合物的相分离和变形过程,提高剪切成型物的柔韧性,是影响剪切工艺重构植物蛋白结构的关键因素。原料属性不同,所需加工温度不同,使用 *Couette Cell* 在不同温度下剪切豌豆分离蛋白与小麦麦麸蛋白混合物,95 °C 的剪切成型物呈软面团状,110 °C 为含小部分纤维的形态弱凝胶,120 °C 为纤维结构,130 °C 为脆性的纤维结构,140 °C 则是层状结构。采用相同条件、在 95~140 °C 下剪切大豆分离蛋白与小麦麦麸蛋白混合物,不管温度如何变化,剪切成型物均具有明显的纤维结构^[62]。由于 *Couette Cell* 加工植物蛋白肉的剪切力恒定、机械能耗比挤压工艺下降约 10%,加工容量扩大时不需要重新设计设备,增加剪切区长度即可,极具工业应用生产植物蛋白肉潜力,热剪切技术已获得联合利华、奇华顿、宜瑞安等公司共同投资,相关研发试用正在推广阶段。

3 植物蛋白肉质构特性

动物肉的独特质感来源于肌肉的组织结构。肌肉的主要组分是由结缔组织包围支撑的肌纤维。肌纤维直径为 10~100 μm,长度为 10~40 mm,由直径 4~16 nm 的肌凝蛋白与直径 6~8 nm 的肌动蛋白相互交叠为肌丝形成。肌纤维的排列结构和直径大小直接影响肉的风味质构。肌纤维束中的肌纤维数越多,肌纤维越细,肉就越细嫩。包围肌纤维的结缔组织主要包括胶原蛋白与弹性蛋白,其在肌纤维束上的分布状态与肉的韧性密切相关,而肌纤维所吸附结合的水分状态是影响肉多汁性的重要因素^[63]。

模拟动物肉精细复杂的肌肉组织结构,塑造动物肉质感是植物蛋白肉发展最为制约的难题。即使外观相差无几,通过感官评定结合质地特性测试和微观结构分析,能够清楚地区分植物蛋白肉与动物蛋白肉的差异以及植物蛋白肉制品自身的质构特性好坏。Kim 等人使用双孢蘑菇菌丝体替代大豆蛋白制作植物蛋白仿牛肉馅饼,发现制品中的纳米颗粒减少,纤维定向排列增加。然而,尽管馅饼的硬度、弹性与咀嚼感以及鲜味都有提升,专业感官评定人员仍然认为这款产品与真实的牛肉馅饼相差较

远^[30]。Chiang等^[64]在高水分挤压制备植物蛋白肉中改变大豆浓缩蛋白与小麦麦麸蛋白比例,发现使用30%麦麸蛋白的挤出物具有最高的组织化程度、硬度与咀嚼感,纤维结构由更小的纤维丝连接而成,二硫键是挤出物形成纤维结构的主要动力,而大量氢键的形成维持了纤维结构的稳定。Chiang等^[65]还使用牛骨水解物与核糖的美拉德反应产物与大豆浓缩蛋白混合,通过高水分挤压制备植物蛋白仿鸡胸肉。发现在49%水分下的挤出物虽然质构特性和微观结构最接近白煮鸡胸肉,但与白煮鸡胸肉相比,颜色依旧偏暗,含水量低、硬度低。与此类似,Sharima-Abdullah制备的植物蛋白仿鸡肉块与市售鸡肉块相比,颜色偏黄,亮度、硬度、咀嚼感、弹性、粘性测试值低^[26]。Samard和Ryu^[66]以重量比例为40:60的大豆蛋白和小麦麦麸蛋白为原料,不添加其他配料在45%水分下挤压制备植物蛋白肉,比较挤出物与猪肉、牛肉以及鸡肉的性能差异,发现尽管溶解氮指数、完整性指数以及咀嚼感与鸡肉相似,植物蛋白肉的吸水能力、弹性与粘聚性指标与动物肉差异显著,作者推测通过扫描电子显微镜在挤出物定向纤维结构中观察到的大量无规则形状气泡是导致植物蛋白肉与动物肉差异的主要原因。

感官评定具有主观性,不能客观量化评价植物蛋白肉制品的质构特性;质构仪虽然可以量化测试弹性、硬度、脆性、嫩度以及咀嚼感等指标,但测试结果容易受植物蛋白肉的水分含量影响,与纤维形成结构的相关性不高;依赖于扫描电子显微镜的微观结构分析,在操作中需要对样品进行切割,容易破坏产品原有结构,不能准确反映纤维形成的完整细节。为获得更多的植物蛋白肉结构信息以指导生产技术改进,一些方便快捷、无创性的检测手段也开始应用于植物蛋白肉质构特性考察。

Schreuders等^[62]以大豆分离蛋白与小麦麦麸蛋白或分离豌豆蛋白与小麦麦麸蛋白为原料,使用热剪切技术在120℃下加工植物蛋白肉,通过共聚焦荧光显微镜观察到微观结构中大量定向排列的长条状纤维,借助三维X射线断层成像技术对植物蛋白肉微观结构中的气泡量与气泡几何形状变化进行分析,发现剪切温度升高会促进植物蛋白肉微观结构中的气泡合并逃逸,导致结构内部出现大空洞,弹性降低。此外,Schreuders等^[67]通过低场核磁共振技术测试了不同原料的水分横向弛豫时间T₂,用以考察纤维状蛋白结构在高温下的流变学性质变化。由于豌豆分离蛋白的T₂小于小麦麦麸蛋白的T₂,两者形成的均相纤维状蛋白中小麦麦麸蛋白的含量比豌豆分离蛋白高,而大豆分离蛋白T₂大于小麦麦麸蛋白的T₂,两者所形成的均相纤维状蛋白中的小麦麦麸蛋白的含量比大豆分离蛋白低,导致豌豆分离蛋白与大豆分离蛋白分别与小麦麦麸蛋白混合进行热剪切时的流变学性质不同。Guo等^[36]使用水分横向弛豫时间T₂分析了水分在以大豆分离蛋白与小麦麦麸蛋白为原料的植物蛋白肉中的存在状态与迁移情况,发现当小麦麦麸蛋白用量从30%增至40%时,代表非结合水的横向弛豫时间T₂₁与T₂₂数值增加,

说明植物蛋白肉的微观结构内部松散出现裂缝,水的流动性增强。与此对应,红外光谱分析也发现在植物蛋白肉中与氢键结合相关、代表蛋白质稳定二级结构的 α -螺旋与反向平行 β -折叠的比例减少,而松散的 β -转角比例增加。豌豆蛋白的低水分挤压、螺旋藻与羽扇豆混合物的高水分挤压以及花生蛋白的高水分挤压研究也发现 α -螺旋与 β -折叠增加可以稳定植物蛋白肉制品的网状结构^[20,23,25]。

4 植物蛋白肉营养组成

营养价值是消费者选择植物蛋白肉产品的重要考虑因素。理想的植物蛋白肉应该在蛋白质、脂肪和碳水化合物三大重要指标上接近或优于动物肉,而且能够提供动物蛋白肉富含的维生素与微量元素^[68]。

植物蛋白质与动物蛋白质在氨基酸模式与蛋白质消化率上存在较大差异。豆类蛋白的含硫氨基酸含量与谷物蛋白的赖氨酸含量均低于动物蛋白质^[24]。而蛋白质在高温高压下发生的美拉德反应与二硫键交联等作用,会进一步降低植物蛋白肉中的赖氨酸与含硫氨基酸的含量。植物蛋白质的消化率通常低于动物蛋白,而且容易受加工方式等多重因素影响。作为使用最为广泛的植物蛋白肉原料,大豆蛋白的必需氨基酸组成符合人体需求,除蛋氨酸含量略低外其余必需氨基酸丰富,更为重要的是大豆蛋白的消化率约为60%,经热处理后可以提高至90%,与动物肉接近。复配不同种类的蛋白质作为原料或添加氨基酸进行补充,并且通过加热、挤压或发酵等预处理手段提高原料的蛋白质消化率,是提高植物蛋白肉制品中蛋白质质量的有效方法。

动物油脂的主要脂肪酸为长链脂肪酸,包括油酸、棕榈酸、硬脂酸和亚油酸,以油酸含量最高。动物油脂的饱和长链脂肪酸含量超过30%。而不同种类的植物油脂在脂肪酸组成上存在明显差异。如油菜籽和葵花籽的主要脂肪酸均为长链脂肪酸,但油酸在油菜籽中含量最高,亚油酸在葵花籽中含量最高。椰子油主要由中链脂肪酸和长链脂肪酸组成,月桂酸、豆蔻酸以及棕榈酸含量丰富^[69]。杨春英等^[70]对国内市场品牌的15种食用植物油(包括菜籽油、椰子油、葵花籽油、大豆油等)的脂肪酸进行气相色谱-质谱分析,发现除椰子油外,其余14种植物油中的不饱和脂肪酸含量均达75%以上。亚油酸等不饱和脂肪酸具有降血压和降胆固醇等多重生理功能,中链脂肪酸也被证实具有降低体重、改善脂代谢的作用,因此,植物油脂被视为植物蛋白肉制品营养价值的重要体现。

虽然动物肉的原始碳水化合物含量极低,但其加工过程中通常会添加碳水化合物以增加乳化性等加工性能。碳水化合物可以提高产品的风味与形态,是植物蛋白肉的必需组成要素。如单糖参与的美拉德反应能够生成肉类特征香气物质,多糖的粘性与凝胶性能够提高产品纤维结构的稳定性。不仅如此,羧甲基纤维素、黄原胶和阿拉伯胶等植物蛋白肉粘合剂被报道具有类似膳食纤维的作用,有利于

控制体重与血脂^[71]。然而,植物蛋白肉所用的碳水化合物不仅包括健康的膳食纤维,也可能包括被认为不利于健康的淀粉和精制糖。

Bohrer^[72]对不同品牌的植物蛋白肉制品与动物肉的同类产品进行了营养差异对比分析。发现来自 Beyond Meat 以及 Impossible Food 的植物蛋白肉汉堡饼虽然热量值与麦当劳牛肉汉堡饼接近,但蛋白质、脂肪与饱和脂肪酸含量低,碳水化合物和膳食纤维含量高,并且不含胆固醇;Gardein 品牌的植物蛋白肉仿牛肉丸的蛋白质含量与 Tyson 品牌的牛肉丸相似,但脂肪含量低,膳食纤维含量高;与 Tyson 品牌的鸡肉块相比,Quorn 品牌的植物蛋白肉仿鸡肉块的蛋白质含量、脂肪含量以及热量低,膳食纤维含量高。Sharima-Abdullah 等^[26]使用鹰嘴豆粉、小麦粉、大豆分离蛋白、盐、多聚磷酸钠、洋葱粉、鸡肉香精与棕榈油硬脂等制备植物蛋白仿鸡肉块,发现与市售鸡肉块相比,产品的蛋白质、碳水化合物以及灰分的含量高,含水量与脂肪含量低。上述对比测试显示植物蛋白肉制品具有低胆固醇、低脂肪与高膳食纤维的产品优势。

动物肉制品是人类摄入微量元素与 B 族维生素的重要来源。植物蛋白肉制品可以通过变更原料组合、添加营养素强化剂,提供与动物肉接近的微量营养素指标。Kumar 等^[73]使用大豆蛋白、蘑菇、小麦麦麸等制备了植物蛋白肉的仿鸡肉块,发现制品的油脂、胆固醇、游离脂肪酸以及钠的含量均低于鸡肉块,而钾、锌和铁的含量显著高于鸡肉块。Caporgno 等^[31]以大豆分离蛋白与原始小球藻为主要原料通过高水分挤压制备植物蛋白肉,发现添加原始小球藻能够提高制品的维生素 B 和维生素 E 含量。Fresán 等^[74]从市场收集了 56 种植物蛋白肉制品,发现以大豆为主要原料的植物蛋白肉制品不仅含有更多膳食纤维与 ω -3 脂肪酸,微量元素铁、锌、维生素 B₁、维生素 B₂、维生素 B₆ 以及叶酸的含量也更高;而以坚果为主要原料的植物蛋白肉制品的脂肪、单不饱和脂肪酸与烟酸的含量更高。Cutain 和 Grafenauer^[75]发现从市场收集的 137 种植物蛋白肉制品(包括植物蛋白肉汉堡、植物蛋白肉馅、植物蛋白肉香肠等)中,有 18% 的产品添加了锌强化剂,20% 的产品添加了铁强化剂,24% 的产品添加了维生素 B₁₂ 强化剂。Gonowrie 等^[76]从特立尼达和多巴哥地区收集了多款植物蛋白肉产品,发现收集的植物蛋白肉产品不但铁含量接近动物肉制品,而且钙、维生素 B₁₂ 与维生素 B₆ 含量的平均值都高于动物肉制品。但是,不同品牌产品的微营养素测试结果相差极大。由此可见,基于原料性质和加工工艺的差异,只有对植物蛋白肉制品的营养组分进行准确的分析测试,才能客观真实地评价市场所售植物蛋白肉与动物肉制品营养价值孰优孰劣。

5 结论

在环境资源保护压力、消费者生活理念改变以及风险资本市场运作的共同推动下,近年来现代植物蛋白肉发展迅速。然而,植物蛋白肉制品与动物

肉同类产品仍然存在一定差距。鉴于原料组分与加工工艺是共同决定植物蛋白肉制品质量的关键因素,植物蛋白肉的后续研发仍然应该以动物蛋白肉的风味质构与营养价值为导向,在加强对植物蛋白肉的风味、微观质构与营养全方位了解的基础上,充分借助合成生物学等新技术挖掘开发生产各类优质原料,深入探讨原料组分的相互作用与加工工艺对原料组分特性的动态影响作用机制,才更有可能制造出“不是肉胜是肉”、满足消费者感官与健康需求的植物蛋白肉产品。

参考文献

- [1] Schipanski M E, Bennett E M. The influence of agricultural trade and livestock production on the global phosphorus cycle [J]. *Ecosystems*, 2012, 15(2): 256-268.
- [2] Revell B. Meat and milk consumption 2050: The potential for demand-side solutions to greenhouse gas emissions reduction [J]. *EuroChoices*, 2015, 14(3): 4-11.
- [3] Wheeler T, Kay M. Food crop production, water and climate change in the developing world [J]. *Outlook on Agriculture*, 2010, 39(4): 239-243.
- [4] Pettigrew P S. 21st century politics: Reconciling the spirit and ethics of liberalism [J]. *Vital Speeches of the Day*, 2003, 69(11): 337-343.
- [5] Sinclair R. Greenhouse gas emissions from public consumption in Gothenburg [D]. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2013: 10-13.
- [6] Wolk A. Potential health hazards of eating red meat [J]. *Journal of Internal Medicine*, 2017, 281(2): 106-122.
- [7] Chang Q Z, Wang W K, Regev-Yochay G, et al. Antibiotics in agriculture and the risk to human health: How worried should we be? [J]. *Evolutionary Applications*, 2015, 8(3): 240-247.
- [8] Post M J. Cultured beef: Medical technology to produce food [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(6): 1039-1041.
- [9] Stephens N, Di Silvio L, Dunsford I, et al. Bringing cultured meat to market: Technical, socio-political, and regulatory challenges in cellular agriculture [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 78: 155-166.
- [10] van der Goot A J, Pelgrom P J M, Berghout J A M, et al. Concepts for further sustainable production of foods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 168: 42-51.
- [11] Wild F, Czerny M, Janssen A M, et al. The evolution of a plant-based alternative to meat. From niche markets to widely accepted meat alternatives [J]. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 2014, 25(1): 45-49.
- [12] Kyriakopoulou K, Dekkers B, van der Goot A J. Plant-based meat analogues [M] // *Sustainable Meat Production and Processing*. New York City: Academic Press, 2019: 103-126.
- [13] Kouris-Blazos A, Belski R. Health benefits of legumes and pulses with a focus on Australian sweet lupins [J]. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2016, 25(1): 1-17.
- [14] Global plant based meat market will reach USD 21.23 billion

- by 2025: Zion Market Research, [2019 - 3 - 28]. <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/03/28/1781303/0/en/Global-Plant-Based-Meat-Market-Will-Reach-USD-21-23-Billion-By-2025-Zion-Market-Research.html>.
- [15] Gbert R, Borders C. Achieving success with meat analogs [J]. Food Technology (Chicago), 2006, 60(1) :28-34.
- [16] Singhal A, Karaca A C, Tyler R, et al. Pulse proteins: from processing to structure - function relationships [M]// Grain Legumes, 2016:55.
- [17] Krintiras G A, Göbel J, Van der Goot A J, et al. Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a Couette Cell [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 160: 34-41.
- [18] 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.
- [19] Lam A C Y, Can Karaca A, Tyler R T, et al. Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality [J]. Food Reviews International, 2018, 34(2) :126-147.
- [20] Beck S M, Knoerzer K, Arcot J. Effect of low moisture extrusion on a pea protein isolate's expansion, solubility, molecular weight distribution and secondary structure as determined by fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214:166-174.
- [21] Samard S, Ryu G H. Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10) :e14123.
- [22] Rehrah D, Ahmedna M, Goktepe I, et al. Extrusion parameters and consumer acceptability of a peanut-based meat analogue [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(10) :2075-2084.
- [23] Zhang J, Liu L, Jiang Y, et al. Converting peanut protein biomass waste into "double green" meat substitutes using a high - moisture extrusion process: A multiscale method to explore a process for forming a meat-like fibrous structure [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(38) :10713-10725.
- [24] Day L. Proteins from land plants - potential resources for human nutrition and food security [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 32(1) :25-42.
- [25] Palanisamy M, Töpfl S, Berger R G, et al. Physico-chemical and nutritional properties of meat analogues based on Spirulina/ lupin protein mixtures [J]. European Food Research and Technology, 2019, 245(9) :1889-1898.
- [26] Sharima - Abdullah N, Hassan C Z, Arifin N, et al. Physicochemical properties and consumer preference of imitation chicken nuggets produced from chickpea flour and textured vegetable protein [J]. International Food Research Journal, 2018, 25(3) :1016-1025.
- [27] Shoaib A, Sahar A, Sameen A, et al. Use of pea and rice protein isolates as source of meat extenders in the development of chicken nuggets [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(9) :e13763.
- [28] Joshi S M R, Bera M B, Panesar P S. Extrusion cooking of maize/spirulina mixture: Factors affecting expanded product characteristics and sensory quality [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(2) :655-664.
- [29] Hashempour - Baltork F, Khosravi - Darani K, Hosseini H, et al. Mycoproteins as safe meat substitutes [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253:119958.
- [30] Stephan A, Ahlborn J, Zajul M, et al. Edible mushroom mycelia of *Pleurotus sapidus* as novel protein sources in a vegan boiled sausage analog system: Functionality and sensory tests in comparison to commercial proteins and meat sausages [J]. European Food Research and Technology, 2018, 244 (5) : 913-924.
- [31] 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.
- [32] Stephanie, G Caporgno M P, Böcker L, et al. Extruded meat analogues based on yellow, heterotrophically cultivated *Auxenochlorella protothecoides* microalgae [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 59:102275.
- [33] Grahl S, Palanisamy M, Strack M, et al. Towards more sustainable meat alternatives: How technical parameters affect the sensory properties of extrusion products derived from soy and algae [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198:962-971.
- [34] Ilo S, Schoenlechner R, Berghofe E. Role of lipids in the extrusion cooking processes [J]. Grasas y Aceites, 2000, 51 (1/2) :97-110.
- [35] Chiang J H, Hardacre A K, Parker M E. Effects of Maillard-reacted beef bone hydrolysate on the physicochemical properties of extruded meat alternatives [J]. Journal of Food Science, 2020, 85 (3) :567-575.
- [36] Guo Z W, Teng F, Huang Z X, et al. Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105:105752.
- [37] Guerrero P, Beatty E, Kerry J P, et al. Extrusion of soy protein with gelatin and sugars at low moisture content [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(1) :53-59.
- [38] Fraser R Z, Shitut M, Agrawal P, et al. Safety evaluation of soy leghemoglobin protein preparation derived from *Pichia pastoris*, intended for use as a flavor catalyst in plant-based meat [J]. International Journal of Toxicology, 2018, 37(3) :241-262.
- [39] Martínez L, Cilla I, Beltrán, J A, et al. Comparative effect of red yeast rice (*Monascus purpureus*), red beet root (*Beta vulgaris*) and betanin (E - 162) on colour and consumer acceptability of fresh pork sausages packaged in a modified atmosphere [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86 (4) : 500-508.
- [40] Singh J P, Kaur A, Shevkani K, et al. Physicochemical characterization of corn extrudates prepared with varying levels of beetroot (*Beta vulgaris*) at different extrusion temperatures [J].

- International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51 (4):911-919.
- [41] Arora B, Kamal S, Sharma V P. Effect of binding agents on quality characteristics of mushroom based sausage analogue [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41 (5):e13134.
- [42] Palanisamy M, Töpfl S, Aganovic K, et al. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 87:546-552.
- [43] Zhang J, Liu L, Jiang Y, et al. High-moisture extrusion of peanut protein -/carrageenan/sodium alginate/wheat starch mixtures; Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99:105311.
- [44] Forghani Z, Eskandari M H, Aminlari M, et al. Effects of microbial transglutaminase on physicochemical properties, electrophoretic patterns and sensory attributes of veggie burger [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54 (8):2203-2213.
- [45] Anderson L A, Islam M A, Prather K L J. Synthetic biology strategies for improving microbial synthesis of "green" biopolymers [J]. Journal of Biological Chemistry, 2018, 293 (14):5053-5061.
- [46] Obata S, Yamato Y, Taniguchi H. Method of manufacturing edible soy protein - containing, simulated meat product: US3982004A [P]. 1976-09-21 [2020-03-24]. <https://patents.globo.top/patent/US3982004A/en>.
- [47] 陈榕钦, 吕茹倩, 梁鹏, 等. 静电纺丝技术在食品科学领域中应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(3):351-356.
- [48] Mattice K D, Marangoni A G. Comparing methods to produce fibrous material from zein [J]. Food Research International, 2020, 128:108804.
- [49] Nieuwland M, Geerdink P, Brier P, et al. Food - grade electrospinning of proteins [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20:269-275.
- [50] 王强, 张金闯. 高水分挤压技术的研究现状、机遇及挑战 [J]. 中国食品学报, 2018, 18(7):1-9.
- [51] Schmiele M. Physical and chemical interactions between isolated soy protein and vital gluten during thermoplastic extrusion at high and low moisture content to obtain meat analogue [D]. 2014. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1-275.
- [52] Mazaheri Tehrani M, Ehtiati A, Azghandi S. Application of genetic algorithm to optimize extrusion condition for soy-based meat analogue texturization [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(5):1119-1125.
- [53] Liu S X, Peng M, Tu S, et al. Development of a new meat analog through twin-screw extrusion of defatted soy flour-lean pork blend [J]. Food Science and Technology International, 2005, 11(6):463-470.
- [54] Omohimi C I, Sobukola O P, Sarafadeen K O, et al. Effect of process parameters on the proximate composition, functional and sensory properties [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2013, 5(7):4-24.
- [55] Fang Y Q, Zhang B, Wei Y M. Effects of the specific mechanical energy on the physicochemical properties of texturized soy protein during high-moisture extrusion cooking [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121:32-38.
- [56] Palanisamy M, Franke K, Berger R G, et al. High moisture extrusion of lupin protein: influence of extrusion parameters on extruder responses and product properties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5):2175-2185.
- [57] Dekkers B L, Boom R M, van der Goot A J. Structuring processes for meat analogues [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 81:25-36.
- [58] Krintiras G A, Diaz J G, Van Der Goot A J, et al. On the use of the Couette Cell technology for large scale production of textured soy - based meat replacers [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169:205-213.
- [59] Krintiras G A, Göbel J, Van der Goot A J, et al. Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a couette cell [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 160:34-41.
- [60] Dekkers B L, Nikiforidis C V, van der Goot A J. Shear - induced fibrous structure formation from a pectin/SPI blend [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 36:193-200.
- [61] Grabowska K J, Zhu S C, Dekkers B L, et al. Shear - induced structuring as a tool to make anisotropic materials using soy protein concentrate [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 188:77-86.
- [62] Schreuders F K G, Dekkers B L, Bodnár I, et al. Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261:32-39.
- [63] Dekkers B L. Creation of fibrous plant protein foods [D]. Wageningen: Wageningen University, 2018.
- [64] Chiang J H, Loveday S M, Hardacre A K, et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues [J]. Food Structure, 2019, 19:100102.
- [65] Chiang J H, Hardacre A K, Parker M E. Extruded meat alternatives made from Maillard - reacted beef bone hydrolysate and plant proteins; Part I - Effect of moisture content [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55 (2):649-659.
- [66] 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.
- [67] Schreuders F K G, Bodnár I, Ermi P, et al. Water redistribution determined by time domain NMR explains rheological properties of dense fibrous protein blends at high temperature [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101:105562.
- [68] Kumar P, Chatli m K, Mehta N, et al. Meat analogues; Health promising sustainable meat substitutes [J]. Critical Reviews in

(下转第350页)

用[J].江苏农业科学,2010(5):401-402.

[39]赵春燕,叶春苗,李成莹,等.壳聚糖复合涂膜处理对采后杏鲍菇贮藏品质影响[J].食品研究与开发,2017,38(3):202-207.

[40]杨霞,王大平.天然生物保鲜剂 Nisin 不同处理对鲜切莲藕的保鲜效果[J].贵州农业科学,2012,40(12):178-180.

[41]张海生,刘霞,张娇娇,等.复合涂膜保鲜剂对鲜切苹果保鲜品质的影响[J].保鲜与加工,2018,18(5):21-25.

[42]宋遵阳.乳酸链球菌素、 ϵ -聚赖氨酸和壳聚糖的联合使用对鲜切胡萝卜白化现象的研究[D].泰安:山东农业大学,2016.

[43] Chen C, Hu W, Zhang R, et al. Levels of phenolic compounds, antioxidant capacity, and microbial counts of fresh-cut onions after treatment with a combination of nisin and citric acid[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2016, 57(3):266-273.

[44]朱海华,谭静,平洋,等.一种快速检测乳与乳制品中单核细胞增生李斯特氏菌的方法[J].中国乳品工业,2019,47(10):55-58.

[45] Wemmenhove E, Valenberg H J F, Hooijdonk A C M V, et al. Factors that inhibit growth of *listeria monocytogenes* in nature-ripened gouda cheese: A major role for undissociated lactic acid[J]. Food Control, 2018, 84:413-418.

[46]龚东磊,王娇.乳酸链球菌素对益生菌乳饮料后酸化及活菌数的影响[J].现代食品,2017(7):126-128.

[47] Mar A C V, Melian C, Castellano P, et al. Synergistic antimicrobial effect of lactocin AL 705 and nisin combined with organic acid salts against *listeria innocua* 7 in broth and a hard cheese[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(1):267-275.

[48] Karina P, Julio C, Leda G, et al. Behavior of *listeria monocytogenes* type 1 355/98 (85) in meat emulsions as affected by temperature, pH, water activity, fat and microbial preservatives[J]. Food Control, 2011, 22(10):1573-1581.

[49]朱亚,师红新,赵永平.花椒提取物和乳酸链球菌素复配冷鲜肉保鲜效果的影响[J].广东农业科学,2018,45(7):

111-115.

[50] Bingol E B, Akkaya E, Hampikyan H, et al. Effect of nisin-EDTA combinations and modified atmosphere packaging on the survival of *Salmonella enteritidis* in Turkish type meatballs[J]. CyTA-Journal of Food, 2018, 16(1):1030-1036.

[51]罗林根,朱明扬,黄谦,等.乳酸链球菌素及其在食品中的应用研究进展[J].浙江农业科学,2020,61(5):1003-1005.

[52] Sun J, Zhu H, Guo J, et al. The bacteriostasis study of nisin for the raspberry health draft beer[J]. Physics Procedia, 2012, 25:973-977.

[53]王利平,沈颖,陈丹丽,等.乳酸链球菌素(Nisin)对蓝莓果酒前期发酵质量的影响[J].中国食品添加剂,2019,30(7):168-172.

[54]刘欣,王文艳,王娟,等.乳酸链球菌素对桶子鸡的保鲜效果[J].食品工业,2019,40(7):6-10.

[55]常云鹤,冯红霞,马立志,等.天然防腐剂对红酸汤货架期菌落总数及 pH 的影响[J].中国调味品,2019,44(11):91-93.

[56]刘琨毅,王琪,郑佳,等.乳酸链球菌素在中式腊肠防腐保鲜中的应用[J].中国食品添加剂,2018(2):144-149.

[57]易建华,朱振宝.乳酸链球菌素与纳他霉素在低盐酱菜中应用的研究[J].食品工业科技,2008(10):227-228,278.

[58]张攀先.乳酸链球菌素在糕点防腐保鲜中的应用[N].中国食品报,2016-07-25(6).

[59]李作美,黄恩泽.乳酸链球菌素协同纳他霉素在豆腐保鲜中的应用[J].中国酿造,2019,38(2):169-172.

[60]时玉强,刘军,何东平,等.乳酸链球菌素对大豆分离蛋白菌落总数的影响[J].中国油脂,2018,43(12):65-68.

[61]迟明梅,池玉静.防腐剂在卤豆干中的应用[J].中国调味品,2017,42(6):105-108.

[62]王莉嫦.乳酸链球菌素在鸡汁鲍鱼罐头中的应用[J].食品与机械,2013,29(4):174-175,199.

[63]李淑红.乳酸链球菌素在牛排罐头中的应用[J].肉类工业,2007(1):37.

[64]涂钰,孔繁东,刘兆芳.Nisin, natamycin 对调理狭鳕鱼片贮藏品质的影响[J].中国调味品,2017,42(5):17-20.

(上接第 345 页)

Food Science and Nutrition, 2017, 57(5):923-932.

[69] Tvrzicka E, Kremmyda L S, Stankova B, et al. Fatty acids as biocompounds: Their role in human metabolism, health and disease—a review. part 1: Classification, dietary sources and biological functions[J]. Biomedical Papers of the Medical Faculty of the University Palacky, Olomouc Czech Republic, 2011, 155(2):117-130.

[70]杨春英,刘学铭,陈智毅.15种食用植物油脂脂肪酸的气相色谱-质谱分析[J].食品科学,2013,34(6):211-214.

[71] Chawla R, Patil G R. Soluble dietary fiber[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2010, 9(2):178-196.

[72] Bohrer B M. An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products[J]. Food Science and Human Wellness, 2019, 8(4):320-329.

[73] Kumar P, Kumar R R. Product profile comparison of analogue meat nuggets versus chicken nuggets[J]. Fleischwirtschaft International: Journal for Meat Production and Meat Processing, 2011(1):72-74.

[74] Fresán U, Mejia M A, Craig W J, et al. Meat analogs from different protein sources: A comparison of their sustainability and nutritional content[J]. Sustainability, 2019, 11(12):3231.

[75] Curtain F, Grafenauer S. Plant-based meat substitutes in the flexitarian age: An audit of products on supermarket shelves[J]. Nutrients, 2019, 11(11):2603.

[76] Gonowrie A. Cost effectiveness comparison related to cost per product nutrient of available meat alternatives and meat products in supermarkets and health food stores of Trinidad[R]. Trinidad and Tobago: The University of the West Indies, 2016.