



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Food Safety and Health—Review

植物蛋白基仿生肉制品研究进展

孙翠霞^a, 葛姣^a, 何君^a, 甘人友^b, 方亚鹏^{a,*}

^a Department of Food Science and Engineering, School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

^b Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610213, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 November 2018

Revised 1 December 2019

Accepted 3 January 2020

Available online 29 October 2020

关键词

仿生肉制品
加工工艺
营养安全
可接受度

摘要

蛋白质是人类健康生活必需的营养元素, 动物源肉制品是人体补充蛋白质的主要来源。随着全球人口持续增长, 人们对蛋白质的需求快速增加, 传统畜牧业由于生态环境和动物福利的压力, 无法生产足够的肉制品供人类消费。通过一定技术手段制备具有动物肉的纤维结构、质构、颜色、风味、口感、外观的仿生肉制品, 充分响应了绿色、环保、健康、可持续发展的理念。本文聚焦植物蛋白基仿生肉制品, 重点综述了仿生肉制品的产品配方和制备技术, 并基于营养安全角度分析了消费者对仿生肉制品的接受程度。此外, 总结了仿生肉制品现阶段发展所面临的主要挑战, 并展望了其发展前景。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

蛋白质是人类健康生活必需的营养元素, 摄取高蛋白食物成为一种饮食趋势。动物源肉制品是人体补充蛋白质的主要来源, 然而牲畜饲养占用大量土地和水资源, 并排放大量二氧化碳, 对生态环境产生重要影响[1–3]。此外, 动物源肉制品由于“疯牛病”“禽流感”“非洲猪瘟”等对人体健康存在安全隐患[4]。现有研究表明, 红肉的摄入会导致缺血性心脏病、肥胖症流行, 增加关节发炎[5]和直肠癌[6]的风险。为减轻环境压力、贯彻可持续发展的理念, 开发仿生肉用于替代动物肉成为食品行业的研究热点。仿生肉 (artificial meat) 模拟了动物肉的某些特性, 如具有动物肉的纤维结构、质构、

颜色、风味、口感、外观, 而本质上并不是肉[7,8]。作为传统肉类的替代品, 仿生肉不仅具备绿色、环保、节能、安全、营养、健康等特点, 而且充分体现了动物福利和人道主义[9]。根据仿生肉的概念及制造工艺, 可分为两大类, 一类是细胞培养肉 (cultured meat), 一类是植物蛋白肉 (plant-based meat analogues)。细胞培养肉是从动物肌肉组织分离提取干细胞后在培养基中培养、生长与分化形成的[10,11]。优点是相似度高, 因为其源自于动物肌肉组织细胞, 缺点是生产成本低、技术难度大、不易规模化生产、消费者接受度低[12,13]。植物蛋白肉是指多孔丝状结构的低水分拉丝蛋白经过复水、抽丝、斩拌、黏合等工艺制备而来的仿生肉制品。因植物蛋白资源丰富、廉价易得、氨基酸组成均衡, 且

* Corresponding author.

E-mail address: ypfang@sjtu.edu.cn (Y. Fang).

具有降血糖、预防心血管疾病等多种生理功能，故植物蛋白肉可作为传统动物肉的良好替代品。本文聚焦植物蛋白基仿生肉，重点综述了仿生肉的产品配方和制备技术，并基于营养安全角度分析了消费者对仿生肉的接受程度。此外，总结了仿生肉现阶段存在的挑战，并展望了其发展前景。

2. 仿生肉的制备原料与市售产品

蛋白质是人体生长和维持机体功能的重要成分。植物蛋白来源丰富，主要包括谷类如小麦、水稻、玉米，油料种子如油菜籽和红花籽，以及豆类如大豆、豌豆和鹰嘴豆[14,15]。不同的理化性质、结构和功能特性取决于不同的蛋白质类型。目前用于制备植物蛋白基仿生肉的主要蛋白是大豆蛋白、谷蛋白和豌豆蛋白[16]。大豆蛋白，包括大豆分离蛋白和大豆浓缩蛋白，由于其含量丰富、价格低廉，以及具有与动物蛋白相似的优质氨基酸组成，是组织化蛋白产品的主要成分[17,18]。大豆蛋白在预防心血管疾病方面也发挥着潜在作用。如美国食品和药品管理局批准了一项健康声明，称每天摄入25 g大豆蛋白可以降低胆固醇和患冠心病的风险[19]。以大豆为基础的仿生肉不仅具有较高的蛋白质水平和与肉类相当的营养价值，而且由于含有可选成分[20]，胆固醇和脂肪的含量很少或为零。然而，大豆蛋白由于含抗营养因子和潜在的致敏性，在应用领域受到限制[21]。谷蛋白是一种较大的二硫链蛋白组装体，由于它可以形成三维网络结构，被广泛用于植物蛋白基仿生肉的生产中[22,23]。小麦过敏作为儿童食物过敏最常见的致敏因素之一，通常作用于儿童早期[24]。豌豆蛋白具有低过敏、高营养价值及良好的乳化和泡沫稳定能力，是制备仿生肉最具前景的蛋白质[25]。以豌豆为基料的仿生肉结构比大豆为基料的产品更柔软，弹性更小，因为豌豆蛋白的胶凝能力更弱[26]。值得一提的是，尽管植物蛋白是很好的蛋白质来源，但许多植物蛋白缺乏一种或多种必需氨基酸。因此，在植物蛋白基仿生肉的配方中，通常将豆类蛋白和谷类蛋白复配使用以达到营养和功能方面的目的[27]。

单一蛋白质的功能特性和营养价值有限，将蛋白质与其他组分复合可以实现协同增强效应。在大豆蛋白基仿生肉中添加谷蛋白可以改善感官性状[28,29]。添加大豆纤维（5%~10%）可以使仿生肉具有更定向和更精细的质地[30]。Iota-卡拉胶（ICGN）具有很强的持水能力。

ICGN的加入改善了仿生肉的组织化度，提高了整体接受度。研究表明，ICGN添加量为1.5%的大豆蛋白仿生肉感官评分最高[31]。此外，在仿生肉的配方中添加维生素（维生素B₁₂）和微量元素（铁和钙）可进一步改善健康饮食，特别是纯素食饮食，显著提高消费者接受度。然而，腌制、烟熏、油炸和烧烤等是食品加工为美味食物必须的烹饪过程，该过程可能会影响仿生肉的营养价值和消费者接受度[32,33]。与动物源牛肉相比，植物蛋白基仿生肉具有更高含量的不饱和脂肪酸、钾、钙和磷，在烹饪后，其营养价值几乎没有发生变化[34]。

仿生肉通常被切成特定形状，市售产品的尺寸在6~20 mm之间[35]。目前，在仿生肉制品的创新研究方面，美国和德国、法国、荷兰、英国、意大利、瑞典等欧洲国家居于领先地位。比尔·盖茨、莱昂纳多·迪卡普里奥、谢尔盖·布林等投资者对该领域表现出极大兴趣，投资的多家初创企业如Beyond Meat、Impossible Foods等现已成为集研发、生产和销售仿生肉制品于一体的全球知名公司。Beyond Meat成立于2009年，2016年推出植物蛋白基仿生肉Beyond Burger。2019年5月Beyond Meat在美国挂牌上市，成为“人造肉第一股”。其产品主要划分为即食与冷冻两类，前者有汉堡和香肠，后者有牛肉碎等。Beyond Meat已经在超过2.8万家零售店和3.6万家餐厅出售。Beyond Meat的目标并不是少数的素食主义者，实际上是更普遍的肉食类人群。麦当劳、肯德基已与Beyond Meat进行了合作，推出的仿生肉汉堡、炸鸡块反响不错。Impossible Foods成立于2011年，2016年推出血色仿生肉汉堡，进入纽约连锁餐厅Momofuku。这款汉堡肉在烘烤时能发出丝丝声，颜色也能和真肉一样逐渐变深，还散发出真肉的香气。其中加入了转基因酵母生产的血红蛋白，从结构、口感、颜色上与真实的牛肉汉堡非常接近。Impossible Foods主要生产牛肉替代品，包括肉碎和肉饼，可用于汉堡、披萨及肉丸等多种食品的制作[36]。

3. 仿生肉的制备技术

纤维纺丝技术用于早期制备仿生肉，它是在20世纪80年代发展起来的。碱性蛋白溶液通过喷丝器挤出到酸性凝固液中，沉淀成细丝，通过结合材料组装成肉类似物[39]。然而，纺丝过程复杂，需要高度浓缩的植物蛋白溶液，而且对大规模应用来说非常昂贵[40]。近年来的主要技术是热塑挤压技术。挤压加工作为食品工业中

众所周知的即食早餐谷物和婴儿食品的生产方法，具有较高的生产效率和能源利用效率。一般情况下，植物蛋白通常以脱脂的形式与水、碳水化合物、盐、调味料和可食用的脂质材料混合，输送入如图1 [41]所示的双螺杆挤出机，在高温和不同水分条件下，形成肉纤维结构。为了生产理想的产品和提高消费者的接受度，需要优化产品配方和加工工艺达到无限接近真正肉类的感官品质，如质地、味道、风味、颜色和口感[42]。由“干法挤压”（湿度 $< 30\%$ ）制成的仿生肉，由于口感差，接受度较低。高水分（ $40\% \sim 80\%$ ）条件下的“湿法挤压”技术制备的仿生肉，具有肌肉般的肌理、外观和咀嚼感[43–45]。高水分挤压（HME）工艺提供了更复杂的配方，并且不要求所有成分具有较高溶解度，是一种更可靠和更具成本效益的技术[46]。此外，滚筒剪切技术也可用于制备仿生肉。如图2所示的剪切单元装置中，大豆蛋白悬浮液和小麦面筋在线性拉伸流动中凝胶化，并生成纤维产品[47]。该技术使从HME工艺转移到批量工艺中模拟纹理的生产成为可能[48]。此外，利用高温剪切诱导结构化方法形成了大豆蛋白的纤维结构[49]。同时，开发出一种密闭式流变仪，通过在挤压条件下改变热应力和机械应力，从而实现少量食品（约6 g水合小麦面筋）的加工与生产[50]。

4. 仿生肉的安全性及可接受度

对于食品行业来说，消费者的健康和食品安全尤为重要。在中国和日本等东亚国家，大豆蛋白基传统食品

已有两千多年的食用历史，这表明大豆蛋白基食品的安全性。在过去的几十年里，大豆衍生产品已扩展到西方国家，并已成为人类饮食中经济和高质量的植物蛋白来源[51]。然而，研究也提出了大豆饮食可能对人类的认知功能和情绪产生不利影响的担忧[52,53]。

根据欧洲消费者研究，仿生肉在四个主要消费者群体中得到了特别的接受：①寻求健康和均衡营养的消费者；②关注动物福利、可持续和伦理道德的消费者；③注重便利性和具有成本意识的消费者；④放纵和创新导向消费者[33,54,55]。大豆蛋白基奶制品经常被用于替代牛奶以避免不良反应的发生。然而， $10\% \sim 14\%$ 被诊断为牛奶过敏的受试者也对大豆过敏。小肠结肠炎等大豆过敏的临床表现与牛奶过敏的临床表现重叠[56,57]。玉米醇溶蛋白由于不含致敏原在仿生肉制品的制备中具有潜在的应用能力。

此外，以大豆蛋白为基料的仿生肉不得不面对消费者对转基因大豆（GM）的担忧。尽管转基因技术在改变植物蛋白质的物理和营养特性方面在过去20年里取得

表1 Beyond人造肉汉堡和动物源牛肉的营养成分对比

Components	Beyond Burger	Animal-based beef
Protein (g)	20	19
Iron (% DV)	25	12
Saturated fat (g)	5	9
Cholesterol (mg)	0	80
Total fat (g)	22	23

Percent daily value (% DV) is how much a nutrient in a single serving of food contributes to human daily diet.

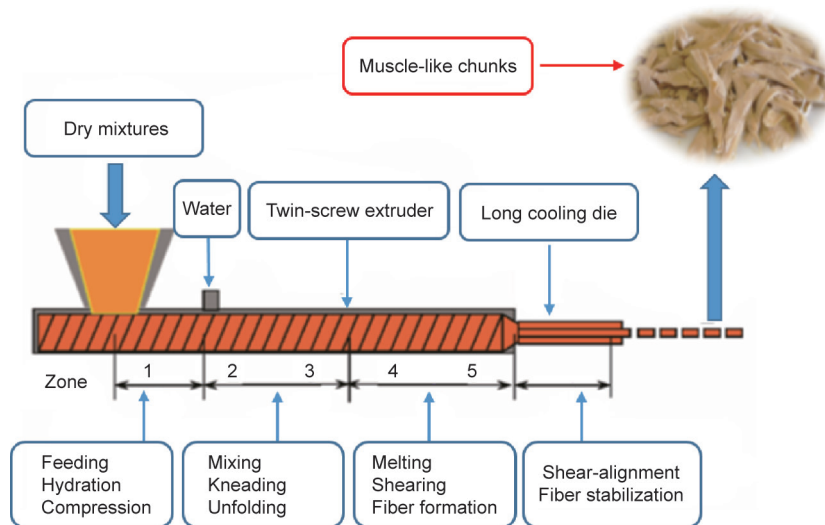


图1. 双螺杆高湿挤压示意图。经许可，复制自参考文献[41]，American Chemical Society, ©2008。

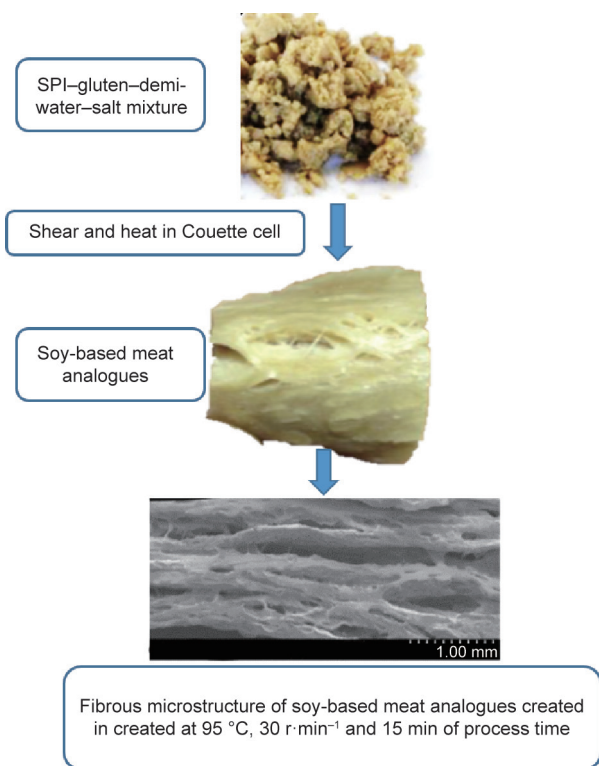


图2. 滚筒剪切制备大豆分离蛋白基仿生肉。经许可，复制自参考文献[23]，Elsevier Ltd., ©2015。

了相当大的进展，但一些消费者仍然怀疑它对人类健康的潜在危害。血红素是一种含铁分子，在动物肌肉中含量丰富，它决定了真正肉类的颜色和味道[58]。血红素是Impossible Burger等植物蛋白类肉产品的关键成分，通过基因工程酵母，将大豆血红蛋白基因简单添加到酵母菌株中，通过发酵培养酵母，并从酵母中分离血红素[59,60]。添加植物基的血红素确实可以增强动物肉类强烈的肉味、香气和烹饪特性。然而，还需要进行进一步的试验以确认其安全性。

5. 仿生肉存在的挑战

从宏观层面看，动物源肉制品的肌肉纤维可以被视觉感知，直径在微米范围内[61]。仿生肉的微观结构决定了其在质地和风味方面是否与肉类具有相似的品质[62]。目前的挤压工艺制备的仿生肉与动物肉在风味、结构和感官方面还存在较大差距，表现为缺乏纤维结构，缺乏肉类的咀嚼度和多汁的口感。因此，仿生肉生产的最大挑战是获得真正动物肉的质地和口感，这可能需要专门设计仿生肉配方和优化加工条件。开发更多低成本和优质的植物蛋白资源以丰富现有植物蛋白品种对

于实现仿生肉营养品质的创新提升具有重要意义。

6. 展望

植物蛋白基仿生肉的开发是改善人类健康、保护自然资源和维持动物福利的一项重要举措。动物肉富含蛋白质、维生素和矿物质，但不含膳食纤维，而膳食纤维作为正常生理/生化过程中必不可少的营养成分，可作为脂肪替代物添加到仿生肉配方中，实现膳食纤维含量的定量调控。食用膳食纤维可以预防糖尿病、肠易激综合征和肥胖。因此，添加膳食纤维的仿生肉更受欢迎。

许多食用组分除了具有营养价值外，还具有预防和治疗疾病的功能，即具有药食同源（MFH）的属性。我国卫生部已批准80多个原材料为MFH材料，如红豆、白扁豆、山药和多种草药。可以结合MFH配料，开发具有中国特色的功能性仿生肉。

在纳米技术中，“自下而上”的分子自组装技术是指结构单元在一定条件下通过非共价作用形成特定结构与功能聚集体的过程。在低pH值和热处理等变性条件下，蛋白质能够通过成核增长的方式组装成纤维，进而形成高度有序的聚集体结构。因此，除了挤压、剪切等热、机械处理外，“自下而上”的方法也可以应用于仿生肉的制备。随着仿生肉制品的可选择数量增加，我们可以享受美味健康的膳食，而不会对地球带来危害。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（31901641、31972023）、上海市科学技术委员会科技创新行动计划重大项目（18JC1410801）、上海市科学技术委员会“扬帆计划”项目（19YF1422400）、上海交通大学“新进青年教师启动计划”项目（18X100040057）的资助。

Compliance with ethics guidelines

Cuixia Sun, Jiao Ge, Jun He, Renyou Gan, and Yapeng Fang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Gerber PJ, Vellinga TV, Steinfeld H. Issues and options in addressing the

- environmental consequences of livestock sector's growth. *Meat Sci* 2010;84(2):244–7.
- [2] Bruinsma J. The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? In: Proceedings of the FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050; 2009 Jun 24–26; Rome, Italy; 2009.
- [3] Evans N, Yarwood R. Livestock and landscapes. *J Landscape Res* 2007;20(3):141–6.
- [4] Centers for Disease Control and Prevention. CDC estimates of foodborne illness in the United States [Internet]. Atlanta: CDC; [cited 2012 Jan 20]. Available from: <http://www.cdc.gov/foodborneburden/2011-foodborneestimates.html>.
- [5] Rohrmann S, Overvad K, Bueno-de-Mesquita HB, Jakobsen MU, Egeberg R, Tjønneland A, et al. Meat consumption and mortality—results from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition. *BMC Med* 2013;11(1):63.
- [6] Larsson SC, Wolk A. Meat consumption and risk of colorectal cancer: a meta-analysis of prospective studies. *Int J Cancer* 2006;119(11):2657–64.
- [7] Arêas JAG. Extrusion of food proteins. *Crit Rev Food Sci Nutr* 1992;32(4):365–92.
- [8] Cheftel JC, Kitagawa M, Quéguiner C. New protein texturization processes by extrusion cooking at high moisture levels. *Food Rev Int* 1992;8(2):235–75.
- [9] Mejia MA, Harwatt H, Jaceldo-Siegl K, Soret S, Sabate J. The future of meat: exploring the nutritional qualities and environmental impacts of meat replacements. *FASEB J* 2016;30(S1):894–8.
- [10] Bhat ZF, Kumar S, Fayaz H. In vitro meat production: challenges and benefits over conventional meat production. *J Integr Agric* 2015;14(2):241–8.
- [11] Post MJ. Cultured meat from stem cells: challenges and prospects. *Meat Sci* 2012;92(3):297–301.
- [12] Bhat ZF, Fayaz H. Prospectus of cultured meat—advancing meat alternatives. *J Food Sci Technol* 2011;48(2):125–40.
- [13] Siegrist M, Sütterlin B, Hartmann C. Perceived naturalness and evoked disgust influence acceptance of cultured meat. *Meat Sci* 2018;139:213–9.
- [14] Asgar MA, Fazilah A, Huda N, Bhat R, Karim AA. Nonmeat protein alternatives as meat extenders and meat analogs. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2010;9(5):513–29.
- [15] Day L. Proteins from land plants—potential resources for human nutrition and food security. *Trends Food Sci Technol* 2013;32(1):25–42.
- [16] Kyriakopoulou K, Dekkers B, Van der Goot AJ. Plant-based meat analogues. In: Galanakis CM, editor. Sustainable meat production and processing. Pittsburgh: Academic Press; 2019. p. 103–26.
- [17] Hughes GJ, Ryan DJ, Mukherjee R, Schasteen CS. Protein digestibility-corrected amino acid scores (PDCAAS) for soy protein isolates and concentrate: criteria for evaluation. *J Agric Food Chem* 2011;59(23):12707–12.
- [18] Malav OP, Talukder S, Gokulakrishnan P, Chand S. Meat analog: a review. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2015;55(9):1241–5.
- [19] Anderson JW, Johnstone BM, Cook-Newell ME. Meta-analysis of the effects of soy protein intake on serum lipids. *N Engl J Med* 1995;333(5):276–82.
- [20] Cavallini V, Hargarten, PG, Joehnk J, inventors; Solae, LLC, assignee. Vegetable protein meat analog. United States Patent US 7070827. 2006 Jul 4.
- [21] Martínez-Villaluenga C, Gulewicz P, Frias J, Gulewicz K, Vidal-Valverde C. Assessment of protein fractions of three cultivars of *Pisum sativum* L.: effect of germination. *Eur Food Res Technol* 2008;226(6):1465–78.
- [22] Ooms N, Jansens KJA, Pareyt B, Reyniers S, Brijks K, Delcour JA. The impact of disulfide bond dynamics in wheat gluten protein on the development of fermented pastry crumb. *Food Chem* 2018;242:68–74.
- [23] Krintiras GA, Gobel J, Van der Goot AJ, Stefanidis GD. Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a Couette cell. *J Food Eng* 2015;160:34–41.
- [24] Keet CA, Matsui EC, Dhillon G, Lenehan P, Paterakis M, Wood RA. The natural history of wheat allergy. *Ann Allergy Asthma Immunol* 2009;102(5):410–5.
- [25] Osen R, Toelstede S, Eisper N, Schweiggert-Weisz U. Effect of high moisture extrusion cooking on protein-protein interactions of pea (*Pisum sativum* L.) protein isolates. *Int J Food Sci Technol* 2015;50(6):1390–6.
- [26] Sun XD, Arntfield SD. Gelation properties of salt-extracted pea protein induced by heat treatment. *Food Res Int* 2010;43(2):509–15.
- [27] Joshi VK, Kumar S. Meat analogues: plant based alternatives to meat products—a review. *Int J Food Ferment Technol* 2015;5(2):107–19.
- [28] Kumar P, Chatli MK, Mehta N, Singh P, Malav OP, Verma AK. Meat analogues: health promising sustainable meat substitutes. *Crit Rev in Food Sci* 2017;57(5):923–32.
- [29] Kumar P, Sharma BD, Kumar RR, Kumar A. Optimization of the level of wheat gluten in analogue meat nuggets. *Indian J Vet Res* 2012;21(1):54–9.
- [30] Smetana S, Larki NA, Pernutz C, Franke K, Bindrich U, Toepfl S, et al. Structure design of insect-based meat analogs with high-moisture extrusion. *J Food Eng* 2018;229:83–5.
- [31] Palanisamy M, Töpfl S, Aganovic K, Berger RG. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues. *LWT* 2018;87:546–52.
- [32] Brisset A. Fibrous proteins for well-being. *Clextusion* 2011;20:14–5.
- [33] Wild F, Czerny M, Janssen AM, Kole APW, Zunabovic M, Domig KJ. The evolution of a plant-based alternative to meat: from niche markets to widely accepted meat alternatives. *Agro Food Ind Hi-Tech* 2014;25(1):45–9.
- [34] Yuan S, Chang SKC, Liu Z, Xu B. Elimination of trypsin inhibitor activity and beany flavor in soy milk by consecutive blanching and ultrahigh-temperature (UHT) processing. *J Agric Food Chem* 2008;56(17):7957–63.
- [35] Riaz MN. Texturized soy protein as an ingredient. In: Yada RY, editor. Proteins in food processing. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2004. p. 517–58.
- [36] beyondmeat.com. [Internet]. Beyond Meat; c2020 [cited 2018 Aug 10]. Available from: <http://beyondmeat.com>.
- [37] impossible foods.com. [Internet]. Impossible; c2020 [cited 2018 Jul 20]. Available from: <https://impossiblefoods.com>.
- [38] Egbert R, Borders C. Achieving success with meat analogs. *Food Technol* 2006;60(1):28–34.
- [39] Yamada TUS, inventor; Otsuka Foods Co., Ltd., assignee. Process for the production of a low-cholesterol all-vegetable meat analog. United States Patent US 4863749. 1989 Sep 5.
- [40] Gallant DJ, Bouchet B, Culioli J. Ultrastructural aspects of spun pea and fababean proteins. *J Food Struct* 1984;3:175–83.
- [41] Liu K, Hsieh FH. Protein-protein interactions during high-moisture extrusion for fibrous meat analogues and comparison of protein solubility methods using different solvent systems. *J Agric Food Chem* 2008;56(8):2681–7.
- [42] Tombs MP. The significance of meat analogues. In: Cole DJA, Lawrie RA, editors. Meat: proceeding of the 21st Easter School of Agricultural Sciences, University of Nottingham. Amsterdam: Elsevier; 1975. p. 525–34.
- [43] Hsieh FH, Huff HE, inventors; The Curators of the University of Missouri, assignee. Meat analog compositions and process. United States Patent US 20120093994. 2012 Apr 19.
- [44] Wild F. Manufacture of meat analogues through high moisture extrusion. In: Smithers G, editor. Reference module in food Amsterdam: Elsevier; 2016. p. 1–9.
- [45] Smetana S, Larki NA, Pernutz C, Franke K, Bindrich U, Toepfl S, et al. Structure design of insect-based meat analogs with high-moisture extrusion. *J Food Eng* 2017;229:83–5.
- [46] Bouvier JM, Campanella OH. Extrusion processing technology: food and nonfood biomaterials. Hoboken: John Wiley & Sons; 2014.
- [47] Krintiras GA, Göbel J, Van der Goot AJ, Stefanidis GD. Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a Couette Cell. *J Food Eng* 2015;160:34–41.
- [48] Akkermans C, Van der Goot AJ, Venema P, Gruppen H, Vereijken JM, Van der Linden E, et al. Micrometer-sized fibrillar protein aggregates from soy glycinin and soy protein isolate. *J Agric Food Chem* 2007;55(24):9877–82.
- [49] Geerts MEJ, Dekkers BL, Van der Padt A, Van der Goot AJ. Aqueous fractionation processes of soy protein for fibrous structure formation. *Innov Food Sci Emerg Technol* 2018;45:313–9.
- [50] Pietsch VL, Karbstein HP, Emin MA. Kinetics of wheat gluten polymerization at extrusion-like conditions relevant for the production of meat analog products. *Food Hydrocoll* 2018;85:102–9.
- [51] Wang H, Murphy PA. Isoflavone composition of American and Japanese soybeans in Iowa: effects of variety, crop year, and location. *J Agric Food Chem* 1994;42(8):1674–7.
- [52] White L, Petrovitch H, Ross GW, Masaki K. Association of mid-life consumption of tofu with late life cognitive impairment and dementia: the Honolulu-Asia aging study. *Neurobiol Aging* 1996;17(4):S121.
- [53] White LR, Petrovitch H, Ross GW, Masaki K, Hardman J, Nelson J, et al. Brain aging and midlife tofu consumption. *J Am Coll Nutr* 2000;19(2):242–55.
- [54] Hoek AC, Luning PA, Weijzen P, Engels W, Kok FJ, de Graaf C. Replacement of meat by meat substitutes. A survey on person- and product-related factors in consumer acceptance. *Appetite* 2011;56(3):662–73.
- [55] Hoek AC, Elzerman JE, Hageman R, Kok FJ, Luning PA, de Graaf C. Are meat substitutes liked better over time? A repeated in-home use test with meat substitutes or meat in meals. *Food Qual Prefer* 2013;28(1):253–63.
- [56] Rozenfeld P, Docena GH, Añón MC, Fossati CA. Detection and identification of a soy protein component that cross-reacts with caseins from cow's milk. *Clin Exp Immunol* 2002;130(1):49–58.
- [57] Sicherer SH. Food protein-induced enterocolitis syndrome: case presentations and management lessons. *J Allergy Clin Immunol* 2005;115(1):149–56.
- [58] Ades IZ. Heme production in animal tissues: the regulation of biogenesis of delta-aminolevulinic synthase. *Int J Biochem* 1990;22(6):565–78.
- [59] Armstrong RS, Irwin MJ, Wright PE. Resonance Raman evidence for constrained heme structure in soybean leghemoglobin and its derivatives. *Biochem Biophys Res Commun* 1980;95(2):682–9.
- [60] Jiang F, Kongsaree P, Charron R, Lajoie C, Xu H, Scott G, et al. Production and separation of manganese peroxidase from heme amended yeast cultures. *Biotechnol Bioeng* 2008;99(3):540–9.
- [61] Seideman SC. Methods of expressing collagen characteristics and their relationship to meat tenderness and muscle fiber types. *J Food Sci* 1986;51(2):273–6.
- [62] Espeleta VA, Mora CCD, inventors. Meat substitute food product and process for preparing the same. United States Patent US 20100074998. 2010 Mar 25.