

崔冰,李晶,梁宏闪,等.植物蛋白肉制品结构设计与研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(6):211-219.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.06.026

植物蛋白肉制品结构设计与研究进展

崔冰,李晶,梁宏闪,陈义杰,李艳,李斌

华中农业大学食品科学技术学院/环境食品学教育部重点实验室,武汉 430070

摘要 为满足未来食品供应的可持续性以及消费者对营养健康的需求,近年来植物蛋白肉制品受到市场的持续关注。尽管目前已经制备出具有纤维质感的植物蛋白肉制品,但还不具备与动物肉组织相同的营养和感官属性,这也是植物蛋白肉制品结构设计的最终目标。本文阐述了动物肉组分的结构和功能,综述了植物蛋白肉制品的原料组成和加工技术,对比了植物蛋白肉制品与动物肉的差异。最终,从优化植物蛋白纤维化技术、开发新型蛋白质资源、构建脂肪组织与结缔组织等效物和调控特征风味等结构设计的角度提出了构建植物蛋白肉制品需要探索的方向,以为新型植物蛋白肉制品的开发提供参考。

关键词 肉类替代品;动物肉;植物蛋白肉制品;组织结构;结构设计;3D打印

中图分类号 TS 201.2⁺1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)06-0211-09

随着全球人口的增长,全人类将面临与粮食供应相关的巨大挑战。根据联合国的统计,预计到2050年,世界人口将接近98亿,肉类消费量增长50%以上^[1]。动物性食品需求的增加会导致诸如水土资源消耗、温室气体排放、动物福利和抗生素耐药性等问题的产生^[2-3]。另有研究表明,过度消费红肉和加工肉制品会导致患结肠癌和缺血性心脏病的相对风险增加^[4-5]。因此,如何在破坏环境的条件下满足不断增长的全球人口饮食需求,应对与饮食相关的慢性疾病的增加及提供各种安全、美味和营养的食品变得至关重要。

目前,备受关注的植物蛋白肉制品是应对这些挑战的可行性解决方案之一^[6]。植物蛋白肉制品不仅能够满足人们的营养需求,同时兼具环保和健康的特性。然而,消费者在选择食品时除关注营养健康外,更加注重风味和口感。近年来,有关植物蛋白肉制品的原料、工艺和配方的研究引起了国内外学者的广泛关注^[7-10]。本文概述了动物肉的组织结构,从结构设计的角度对植物蛋白肉制品的构建进行分析讨论,以为新型植物蛋白肉制品的开发提供参考。

1 动物肉

近年来,随着人们对全球资源、环保和营养健康的重视,新型植物蛋白肉制品广受追捧。在植物基模拟肉领域,不仅出现了众多的初创公司,而且许多传统食品公司已顺势进入,此领域正在成为资本投资和全球食品研究的热点。尽管模拟肉制品生产工艺并不复杂,但其感官、风味和营养的背后还涉及到很多科学知识^[11-12]。在进行植物蛋白肉制品的结构设计前需要了解真实肉的组成、结构和理化特性,这对研究可行的肉类替代品至关重要^[13]。

1.1 动物肉组分的结构和功能

整个动物肉是一个复杂的结构,主要包括肌肉组织、结缔组织和脂肪组织3个结构元素,每个结构元素分别赋予肉制品不同的感官体验。

肌肉组织主要由细长的纤维细胞组成,这些纤维细胞按照复杂的结构分层排列。其中,单个肌肉纤维(即细胞)的长度通常为1~40 mm,直径为20~100 μm ^[14]。肌肉纤维由肌原纤维组成,而肌原纤维又分别由肌球蛋白和肌动蛋白共同组成的粗细肌丝构成。肌肉纤维的质地及其用于水固定化的毛

收稿日期:2021-06-21

基金项目:湖北省自然科学基金创新群体项目(2019CFA011)

崔冰,E-mail:cbtz0817@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:李斌,E-mail:libinfood@mail.hzau.edu.cn

细作用是肉最适合的结构属性,是保持其烹饪后咀嚼性和多汁性的关键^[15]。当人们食用烹煮过的肌肉时,肌纤维蛋白复合物连同胶原纤维(肌束膜和肌内膜)会赋予独特的质感。

结缔组织会在肌肉纤维周围形成薄片将其成束捆扎在肌肉内部使肌肉中的不同组件连接在一起。胶原蛋白是结缔组织中最重要蛋白质,以相互缠绕的三重螺旋形式存在^[16]。胶原蛋白的性质受温度影响,在体温环境下,胶原蛋白分子非常坚硬,为结缔组织提供较高的机械强度。但在加热时(如长时间烹饪),胶原蛋白会分解,导致结缔组织变软,形成软糯的口感^[13]。

脂肪组织由脂肪细胞(通常为几十到几百微米)组成,可以分布在动物的皮肤下方和肌肉内的不同区域,其数量和类型有助于肉制品的外观、口感和风味的形成^[17]。因此,动物肉中各组分是影响结构设计的关键因素,含量不同会影响肉的风味、质地和口感。

1.2 烹饪过程中的变化

烹饪之前,肉制品一般为软固体,是由蛋白质、碳水化合物、脂肪等黏合在一起的复杂混合物。烹饪过程中肉制品变得结实,是因为肉类内部分子结构(如肌纤维蛋白、结缔组织蛋白和脂肪分子等)在高温作用下发生了变化^[11]。而肉汁则是包含水、脂肪、蛋白质和矿物质的混合物,烹饪过程中高温会造成肉汁的流失从而导致肉块明显收缩。因此,肉制品的烹饪过程是从生肉的糊状凝胶状态转变为熟肉的坚硬且多汁状态^[13]。

肉制品的风味取决于生肉中自然存在的成分和烹饪过程中添加的成分(如盐、胡椒、草药和香料)。烹饪会导致肉中蛋白质、脂肪和其他分子发生化学变化,从而形成独特的风味分子混合物。在高温条件下,蛋白质和还原糖发生美拉德反应产生大量的挥发性和非挥发性成分,从而产生特征性的香气和味道,例如肉味和咸味^[18]。另外,美拉德反应过程也会产生熟肉的深棕色,赋予其诱人的外观^[19]。因此,了解动物肉的组成和结构及其对肉制品质地和风味的影响,对于设计与真实肉相似的肉替代品至关重要。

2 植物蛋白肉制品

为达到与动物肉的一致性,研究人员在设计植物蛋白肉制品时所选的主要成分与动物肉类似,并

通过部分加工技术(如挤压等)实现与动物肉类似的纤维状外形。植物蛋白肉制品主要由植物蛋白质、脂肪和水构成,此外还含有其他功能性成分,如黏合剂、着色剂、风味成分、维生素、矿物质和抗氧化剂^[10]。这些成分的类型和浓度以及用于组装它们的加工方法,决定了最终产品的感官属性。目前,市场上推出的植物蛋白肉制品主要包括碎肉类产品(如汉堡肉饼和肉丸)、乳化肉类产品(如香肠)和全切肉类产品(如整块状鸡肉或牛肉)^[6]。因此,本文从原料和加工技术角度阐述影响植物蛋白肉制品品质的因素。

2.1 原料

1)蛋白质。植物源蛋白质作为主要结构性原料应用于各类植物蛋白肉制品中,可同时满足人们对产品质构和营养的需求,主要包括组织化蛋白和非组织化蛋白^[7,20],其对植物蛋白肉制品的质地、持水性等发挥着不同作用^[21]。

与动物肌肉组织中的肌球蛋白和肌动蛋白不同,植物中天然存在的球状蛋白分子不能产生类似肌肉细胞所见的纤维质地和持水性^[6]。因此,植物基蛋白需要通过能量密集的加工过程形成肉纤维状的组织结构。目前报道制备组织化蛋白的植物性蛋白原料主要有大豆蛋白、花生蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白,其中大豆蛋白和小麦蛋白按照一定比例混合可以得到纤维化程度更高的产品^[22]。非组织化蛋白包括分离蛋白和浓缩蛋白,起到提高持水性、乳化固定油脂颗粒和黏合纤维化蛋白的作用,其添加量与最终口感有直接关系^[6]。基于经济性、营养性和加工性能的考虑,豆类蛋白中的大豆和豌豆蛋白以及谷物类蛋白中的小麦面筋蛋白在现有产业应用中最为广泛。不同类型的植物蛋白肉制品对蛋白质种类的要求也不同,在碎肉类产品中,需要模仿肉类纤维的组织结构,必须使用组织化蛋白;在乳化类产品中,非组织化蛋白用量大,主要起到乳化油脂和凝胶的作用;而全切肉类产品则是将蛋白粉等原料直接加入到高水分挤压或剪切设备中生产出来的块状肉类模拟物,其特点是具有长纤维或层状结构^[17]。

2)脂肪。脂肪是肉类或肉类产品中决定风味、质地和口感的主要成分,因此,通常在配方中加入一定比例的脂肪改善产品多汁、嫩滑的口感^[23]。与此同时,在组织化蛋白的生产过程中,为改善纤维结构的品质和口感也会加入一定量的脂肪,但脂肪含量

过高会使纤维结构的硬度和咀嚼性下降^[9]。不同类型的产品对模拟脂肪的要求不同。例如,乳化类素肉制品(如法兰克福香肠)可以选择液态或者固态脂肪,但碎肉类素肉制品(如植物基汉堡肉饼)则需要固态脂肪模拟相应的质地和烹饪特性(油脂受热融化的过程)。因此,研究者们为打造类似动物脂肪的质地和口感,将从热带植物(如椰子和可可豆)中提取的固体脂肪与含有更多不饱和脂肪酸的液体油(如葵花籽油和菜籽油)混合使用,使植物基汉堡肉饼具有与普通碎牛肉相似的外观和烹饪特性^[6]。

3)水分。植物蛋白肉制品中的水分具有多种功能,在食品加工过程中,水分不仅是不同于干燥成分的水合介质,还是增塑剂和反应物,影响其他成分的功能特性。例如,水分会影响蛋白质的溶解度,进而影响其膨胀率、凝胶性、乳化性和起泡性能,最终影响产品的质地和口感^[24]。另外,水分是保持肉类食品多汁性的关键因素^[7],较高的含水量可以提供与真实肉更加相似的感官特性。与天然肌肉纤维中的水分不同,这些水大部分表现为自由水的状态,在进一步的烹饪加工过程中极易发生汁液流失,造成口感不良。因此,为提高烹饪后产品的含水量,高保水性黏合剂经常被加入到配方中。另外,增加含水量还可以降低产品成本。

4)黏合剂。为使产品达到最佳食用口感,植物蛋白肉制品中通常会添加黏合剂。最常使用的黏合剂包括蛋白类和多糖类2种,其原理是利用蛋白或多糖凝胶的特性,使其在产品中形成三维网络结构,将水分子滞留在其中,增加最终产品的持水力。常用的蛋白类黏合剂包括小麦蛋白、大豆分离蛋白、马铃薯蛋白等,在加热过程中蛋白质分子展开,从而暴露出非极性表面基团,这些基团可以通过疏水作用相互结合形成网络结构,促使植物蛋白肉制品形成特定形状^[7]。另外,还可以通过添加交联酶(如转谷氨酰胺酶)使蛋白质发生交联形成凝胶,增加产品的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性等质构特性,显著降低加热后的产品收缩率^[25]。

多糖类黏合剂主要是大分子碳水化合物,具有增稠和凝胶的作用,可以使产品具有较强的弹性和多汁性。部分多糖通过不同胶凝机理形成凝胶,如冷致凝胶(如卡拉胶、琼脂)、热致凝胶(如魔芋胶、甲基纤维素)和离子型凝胶(如海藻酸钠)^[17]。在加热甲基纤维素时,其分子上甲基之间的疏水作用力会

增加,导致其受热形成凝胶^[26],将其应用于植物基汉堡肉饼中,不仅改善了烹饪后的产品质地,还提高了产品的多汁性。此外,为提高植物基汉堡肉饼的多汁性,也采用马铃薯淀粉、魔芋胶和黄原胶等多糖类黏合剂^[9]。

5)着色剂。颜色是肉制品加工的重要品质属性。在自然状态下,动物肉色素呈红色,但加工后肌红蛋白会发生氧合而呈褐色。植物蛋白肉制品中常用的天然色素主要是从红甜菜、红白菜、红浆果、红辣椒和胡萝卜中提取的,可以呈现出红色的外观。然而,这些植物色素在加工过程中可能会变色,或者不会转变为理想的“煮熟”肉的颜色。美国公司Impossible Foods使用的大豆血红素蛋白是一种新型色素,能够复制肉类血红素(血红蛋白和肌红蛋白)的“血色”外观。美国FDA已批准其可用于肉糜类似物,按产品质量计算,最高添加量为0.8%^[7]。

6)风味成分。除了逼真的组织结构外,诱人的滋味、气味是消费者接受植物蛋白肉制品的关键。目前植物蛋白肉制品的风味主要通过添加酵母抽提物、肉类香精或复合香辛料实现^[27]。通过向植物蛋白肉制品中添加风味物质一方面可以掩盖植物蛋白本身的不良气味,如豆腥味、青草味等,另一方面因为植物油脂不具备动物油脂中的天然香气成分,所以添加风味物质可以模拟天然动物脂肪的香气以满足消费者的需求^[28]。

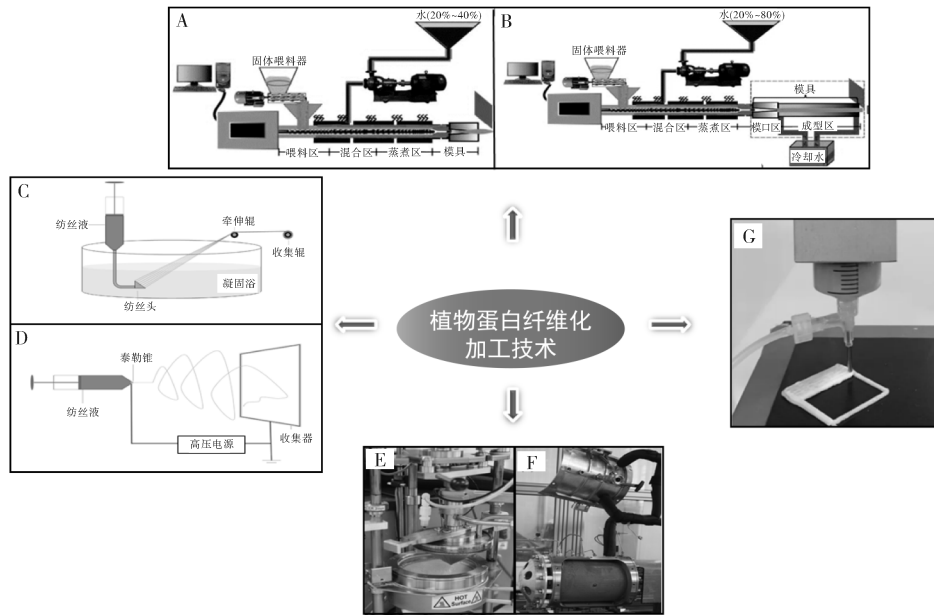
7)维生素、矿物质和抗氧化剂。为使植物蛋白肉制品的营养成分更加接近于动物肉,一般需添加精选的矿物质和维生素。例如,在植物基汉堡肉饼中,Beyond Meat的配方表中添加了钙和铁,Impossible Foods则加入了维生素E^[9]。另外,由于使用植物油替代动物脂肪,植物类产品在加工和操作过程中易发生脂质氧化,因此,可以加入抑制氧化和酸败的抗氧化剂^[29]。

2.2 加工技术

为获得与动物肉组织相似的外形,在植物蛋白肉制品的生产中引进了多种蛋白纤维化加工技术对肉类纤维结构质地进行模拟。植物蛋白纤维化的技术主要有热挤压技术、纺丝技术、剪切技术和3D打印技术。图1对不同类别的植物蛋白纤维化加工技术进行了展示。

热挤压技术的商业化程度最高^[30],其原理是在热挤压过程中破坏维持植物蛋白结构的化学键,使蛋白发生变性形成可塑化的熔融体,再经分子链展开、团聚、聚集、交联形成纤维结构^[31]。目前,主要有2种类型的挤压技术被广泛应用,分别为低水分挤压和高水分挤压技术^[32]。低水分挤压是指在水分含量为20%~40%时对植物蛋白进行挤压膨化的工艺,具有工艺条件成熟、产品柔韧性强等优势,但使用前需进行复水操作^[33];高水分挤压技术是对低水分挤压技术的改进,其水分含量为40%~

80%,这使得挤出物的最终水分含量也超过30%,具有工艺集成度高、产品质地更接近真实肉等优势,可以直接用来模拟全切肉类(如整块状鸡肉或牛肉),是挤压技术的未来发展方向^[32,34]。无论是低水分还是高水分挤压,挤压过程的参数(如物料组成、水分含量、螺杆速度和机筒温度等)是蛋白质形成纤维化结构的关键。例如,在物料选择方面,建议使用脱脂豆粕粉、大豆浓缩蛋白和大豆分离蛋白,因为全脂豆粕的高含油量会导致剪切力降低,不利于产品的纤维化^[35]。加工温度是大豆组织化最重要



低水分(A)与高水分(B)挤压设备模拟图^[7,32];湿法纺丝(C)与静电纺丝(D)的原理图^[35];剪切法生产模拟肉纤维的锥形剪切池(E)和圆筒状库埃特池(F)^[35];3D打印过程(G)^[46]。Low moisture (A) and high moisture (B) extrusion equipment simulation diagram^[7,32]. Schematic diagram of wet spinning (C) and electrospinning (D) processes^[35]. Conical shear cell device (E) and couette cell device (F) used to produce meat-analogue fibrous structures^[35]. 3D Printing process (G)^[46].

图1 植物蛋白纤维化加工技术示意图

Fig.1 Schematic diagram of plant protein fibrosis processing technology

的参数,对交联反应程度至关重要^[36]。另外,提高机筒温度和螺杆速度会增加脱脂大豆粉挤出物的膨胀率、吸水率、水化能力和硬度^[37]。

纺丝技术包含静电纺丝和湿法纺丝。静电纺丝为纳米级纤维纺丝技术,需要施加高电压且要求使用高纯度原料,因此主要用于实验室材料的制备^[38]。湿法纺丝是最早被应用于生产大豆蛋白纤维的技术^[39],在湿法纺丝过程中,纺丝液在外力作用下通过喷丝头挤出,并在盐、酸或碱性溶液中固化形成纤维。因为固化后的纤维需要大量水冲洗,易引起水资源浪费等问题,所以此技术逐渐被挤压技

术替代^[40]。

剪切技术是近年来新兴的肉模拟物纤维制备技术,现仍处于实验室开发阶段^[41]。剪切过程基于流动诱导结构的原理,在剪切池或库埃特池中进行^[42]。剪切池是一种基于锥形板流变仪的锥形设备,而库埃特池则呈圆柱形^[34]。相比于挤压技术,剪切技术的机械能输入减少(大约降低10%),且可以产生类似真实肉的纤维结构^[43]。剪切过程的参数(物料组成、剪切温度、剪切时间和剪切速率等)同样是影响产品性能的关键因素。120℃下,大豆蛋白和果胶混合物料经过剪切诱导可产生层状结构,

在 140 °C 下则生成纤维状结构^[43]。

新兴的 3D 打印技术是将液态或半固态物料从喷头挤出后凝固,通过逐层模仿肌肉纤维结构的方式仿制肉制品,但目前仿真制得的肉制品与真实肉的纤维结构还存在一定差距,需要进一步加快推进 3D 打印技术的研发^[44-46]。

3 植物蛋白肉制品和动物肉的差异

3.1 质构差异

由于纤维化的植物蛋白和肌肉纤维存在天然差异,包括蛋白质分子结构、大小、氨基酸组成、肽序列、有无细胞结构等,难以呈现动物肉制品复杂而精致的感官特征^[47]。在微观上,高度变性的植物蛋白聚集体与肌肉纤维或纤维束的三维各向异性结构并不相似,导致持水力不足,烹饪过程中极易失去水分而产生干燥的口感,因此,植物蛋白肉制品面临的挑战之一是改善植物基纤维结构的持水性^[47]。另外,通过对动物肉的结构分析发现,植物蛋白肉制品很难同时对整块肉的组织结构进行模拟,所以需要加强对植物基脂肪组织和结缔组织等组织结构的开发和构建。

3.2 风味差异

缺乏动物肉的风味是替代产品发展的另一个主要障碍^[48]。虽然可以通过添加天然或合成肉类香精模拟肉类风味,但此类风味不易持久,且天然的苦味和涩味不易被祛除或者掩盖^[49],影响消费者对植物蛋白肉制品的接受度。

3.3 颜色差异

缺乏真实肉色是植物蛋白肉制品应用推广的限制之一^[17]。肉在煮熟的过程中肉色会经历从红色到褐色的变化,新开发的大豆血红蛋白是一种铁结合蛋白,在熟制的过程中可以发生与真实肉相似的颜色变化。大豆血红蛋白已被掺入植物基汉堡中赋予血液颜色,但价格昂贵,因此,开发相似度更高且更加经济的植物源色素产品变得十分必要^[50]。

3.4 营养差异

动物蛋白质是全营养物质,比植物蛋白质具有更好的必需氨基酸平衡。植物蛋白质容易存在限制性氨基酸缺陷,如赖氨酸是谷类蛋白质中的主要限制性氨基酸,而蛋氨酸和半胱氨酸则是豆类蛋白质的限制性氨基酸^[17]。表 1 比较了不同植物和动物来源的蛋白可消化的必需氨基酸评分(DIAAS)和限制性必需氨基酸^[51]。对于全素食人群,如果长期

食用单一植物蛋白质可能会对人体健康产生影响。虽然通过在同一素食产品中使用适当的谷类和豆类蛋白质混合物可以克服此问题,但是植物蛋白肉制品的其他营养成分(如微量元素和矿物质)与动物肉相比也存在差异,因此有必要对植物蛋白肉制品进行营养素强化处理。

表 1 不同植物和动物来源蛋白质的可消化的必需氨基酸评分(DIAAS)和限制性必需氨基酸

Table 1 Comparison of the digestible indispensable amino acid scores (DIAAS) and essential amino acids lacking for different plant and animal sources

蛋白质来源 Protein source	DIAAS	限制性氨基酸 Limiting amino acid
大豆 Soy	91	蛋氨酸+半胱氨酸 Met+ Cys
豌豆 Pea	70	蛋氨酸+半胱氨酸 Met+ Cys
蚕豆 Fava bean	55	蛋氨酸+半胱氨酸 Met+ Cys
玉米 Corn	36	赖氨酸 Lys
大米 Rice	47	赖氨酸 Lys
小麦 Wheat	48	赖氨酸 Lys
燕麦 Oat	57	赖氨酸 Lys
鸡肉 Chicken	108	—
猪肉 Pork	117	—
牛肉 Beef	112	—

4 植物蛋白肉制品未来的研究方向

基于上述分析和概述,在设计和构建植物蛋白肉制品方面,研究人员可以从降低植物蛋白肉制品和动物肉之间的差异方面进行更加深入的探索。

4.1 优化纤维化蛋白的性能

通过对纤维化蛋白加工过程的工艺革新可进一步改善蛋白的质构性能,缩小与动物肉纤维的差异。在高水分挤压过程中加入 0.1% 的海藻酸钠可显著提高花生蛋白的纤维度、弹性和抗拉强度,且纤维化蛋白的硬度和咀嚼性也显著增加,其原因在于一定量的外源多糖可以影响蛋白质的聚集过程,从而改善纤维化蛋白的性能^[52]。在加热条件下,对果胶和大豆分离蛋白混合物进行剪切诱导处理,果胶长丝会沿剪切流方向被包裹在一个连续的蛋白相中,从而诱导共混物的各向异性,且纤维的长度随着果胶浓度的增加和剪切温度的升高而增加^[44]。

4.2 探索新型替代蛋白质资源

通过进一步开发新型蛋白质资源可以改善植物蛋白肉制品的性能并丰富其营养成分。油菜籽、向日葵和藜麦可以提供大量优质蛋白质,在食品工业很受青睐,被认为是大豆的良好替代品,有望在肉类

替代产品中得到应用^[53-55]。与此同时,从水生生物(如微藻、浮萍和海带等)中提取优质蛋白质的技术也处于初始发展阶段^[56]。新型蛋白质资源的开发和有望弥补现有植物蛋白质的营养和质地缺陷。

4.3 模拟脂肪组织

在肉类食品中,脂肪有助于形成口感和风味,是肉制品的重要属性。有研究者采用水和功能成分组成的脂肪替代品模拟脂肪组织^[57-59]。目前已经工业化应用的脂肪替代品有蛋白质基(如大豆蛋白)、脂肪基(如蔗糖聚酯)和碳水化合物基(如改性淀粉、膳食纤维等),其中,碳水化合物基脂肪替代品受到广泛关注^[60-63]。另外,魔芋胶与其他原料(如淀粉、卡拉胶、结冷胶等)共混制得的脂肪模拟物应用于低脂肉制品中,不仅提供了类似脂肪的感官体验,而且提高了产品的持水性,并减少了烹饪损失^[64-65]。

4.4 引入结缔组织等效物

引入软骨或结缔组织样材料,在食品中以质地和外观的形式呈现异质性,更加真实地模拟相关动物肉组织结构,丰富植物蛋白肉制品口感的多样性。在模拟结缔组织方面,由于结缔组织中的胶原蛋白为线性纤维蛋白,因此,线性多糖可能具备制作模拟结缔组织的潜力。例如,魔芋凝胶经适当加工(反复冻融处理)或与其他胶体复配可形成类似结缔组织样材料^[66]。

4.5 调控特征风味

在风味调控方面,不仅要纠正植物蛋白质的异味(如苦味和涩味等),还要模仿真实肉制品所需的香味^[67]。一方面,针对植物蛋白质的异味有必要从源头上(如育种方面)进行研究将不良风味的影响降至最低;另一方面,利用新型酶对植物蛋白进行修饰可产生类似鸡肉和牛肉的香气^[68-69],故可以加强新型酶制剂的研究用于蛋白质酶解或交联形成所需的特征风味。

4.6 开发可食用封装材料和技术

植物蛋白肉制品可以通过添加生物活性成分进行营养强化,改善其营养缺陷。为提高生物活性成分的利用率,通常采用设计良好的递送系统(如乳液、纳米粒子等)对其进行封装,以便成功添加到食品基质中^[70]。另外,封装技术还可以解决色素、风味物质等小分子添加剂在实际应用中存在的环境不

耐受问题^[71],提升它们在肉制品重组、加工及摄食过程中的稳定性和吸收特性。因此,开发新型高效的可食用封装材料和技术可改善植物蛋白肉制品的综合品质。

5 展 望

食品的结构设计会影响其营养健康功能和感官特性。以软凝聚态物理、交叉化学、生物学、工程学为基础的结构食品理论及技术创新,不仅为现有食品的创新设计提供理论支持,而且也是分子食品、3D打印食品等概念食品制造的理论和技术基础。因此,在新型植物蛋白肉制品开发方向,多学科、多领域科研工作人员将共同努力解决更多重要挑战,并有望孕育食品创新设计的颠覆性技术。

参考文献 References

- [1] GODFRAY H C J, AVEYARD P, GARNETT T, et al. Meat consumption, health, and the environment [J/OL]. *Science*, 2018, 361(6399): eaam5324[2021-06-21]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30026199/>. DOI: 10.1126/science.aam5324.
- [2] 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.
- [3] HUDSON J A, FREWER L J, JONES G, et al. The agri-food chain and antimicrobial resistance: a review [J]. *Trends in food science & technology*, 2017, 69: 131-147.
- [4] LARSSON S C, WOLK A. Meat consumption and risk of colorectal cancer: a meta-analysis of prospective studies [J]. *International journal of cancer*, 2006, 119(11): 2657-2664.
- [5] KOUVARI M, TYROVOLAS S, PANAGIOTAKOS D B. Red meat consumption and healthy ageing: a review [J]. *Maturitas*, 2016, 84: 17-24.
- [6] SHA L, XIONG Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: science, technology, and challenges [J]. *Trends in food science & technology*, 2020, 102: 51-61.
- [7] 吴元浩, 徐婧婷, 刘欣然, 等. 植物基仿肉原料的应用与加工现状 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(17): 5955-5963. WU Y H, XU J T, LIU X R, et al. Application and processing status of plant-based meat analogue ingredients [J]. *Journal of food safety & quality*, 2020, 11(17): 5955-5963 (in Chinese with English abstract).
- [8] 郭顺堂, 徐婧婷, 刘欣然, 等. 我国植物蛋白资源高效利用途径与技术创新 [J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(6): 8-15. GUO S T, XU J T, LIU X R, et al. Efficient utilization and technological innovation of plant-based protein resources in China [J]. *Journal of food science and technology*, 2019, 37(6): 8-15 (in

- Chinese with English abstract).
- [9] 欧雨嘉,郑明静,曾红亮,等.植物蛋白肉研究进展[J].食品与发酵工业,2020,46(12):299-305.OU Y J,ZHENG M J,ZENG H L,et al.Advance in plant-based meat research[J].Food and fermentation industries,2020,46(12):299-305(in Chinese with English abstract).
- [10] 张斌,屠康.传统肉类替代品:人造肉的研究进展[J].食品工业科技,2020,41(9):327-333.ZHANG B,TU K.The research advance of traditional meat substitutes-artificial meat[J].Science and technology of food industry,2020,41(9):327-333(in Chinese with English abstract).
- [11] HUGHES J M,OISETH S K,PURSLOW P P,et al.A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness[J].Meat science,2014,98(3):520-532.
- [12] YU T Y,MORTON J D,CLERENS S,et al.Cooking-induced protein modifications in meat[J].Comprehensive reviews in food science and food safety,2017,16(1):141-159.
- [13] MCCLEMENTS D J. Future foods [M].Switzerland: Springer Nature Switzerland AG,2019.
- [14] FRONTERA W R,OCHALA J.Skeletal muscle:a brief review of structure and function [J].Calcified tissue international,2015,96(3):183-195.
- [15] TORBERG E.Engineering processes in meat products and how they influence their biophysical properties[J].Meat science,2013,95(4):871-878.
- [16] LEPETIT J.Collagen contribution to meat toughness: theoretical aspects[J].Meat science,2008,80(4):960-967.
- [17] MCCLEMENTS D J,GROSSMANN L.The science of plant-based foods: constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs[J].Comprehensive reviews in food science and food safety,2021,20(4):4049-4100.
- [18] JAEGER H,JANOSITZ A,KNORR D.The Maillard reaction and its control during food processing: the potential of emerging technologies[J].Pathologie biologique,2010,58(3):207-213.
- [19] AMESJ M.Control of the Maillard reaction in food systems[J].Trends in food science & technology,1990,1:150-154.
- [20] 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.
- [21] ISMAIL I,HWANG Y H,JOO S T.Meat analog as future food:a review[J].Journal of animal science and technology,2020,62(2):111-120.
- [22] 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/OL].Food structure,2019,19:100102[2021-06-21].https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.11.002.
- [23] CALKINS C R,HODGEN J M.A fresh look at meat flavor[J].Meat science,2007,77(1):63-80.
- [24] CORNET S H V,VAN DER GOOT A J,VAN DER SMAN R G M.Effect of mechanical interaction on the hydration of mixed soy protein and gluten gels[J].Current research in food science,2020,3:134-145.
- [25] 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.
- [26] SPELZINI D,RIGATUSO R,FARRUGGIA B,et al.Thermal aggregation of methyl cellulose in aqueous solution:a thermodynamic study and protein partitioning behaviour[J].Cellulose,2005,12(3):293-304.
- [27] 孙宝国.中国第三代肉味香精生产技术[J].中国食品学报,2010,10(5):1-4.SUN B G.The third-generation process technology of meat flavorings in China[J].Journal of Chinese institute of food science and technology,2010,10(5):1-4(in Chinese with English abstract).
- [28] SHI X D,LI J Y,WANG S M,et al.Flavor characteristic analysis of soymilk prepared by different soybean cultivars and establishment of evaluation method of soybean cultivars suitable for soymilk processing[J].Food chemistry,2015,185:422-429.
- [29] XIONG Y L.Inhibition of hazardous compound formation in muscle foods by antioxidative phytophenols[J].Annals of the New York Academy of Sciences,2017,1398(1):37-46.
- [30] 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.
- [31] CHEN Y M,YAMAGUCHI S,ONO T.Mechanism of the chemical composition changes of Yuba prepared by a laboratory processing method [J].Journal of agricultural and food chemistry,2009,57(9):3831-3836.
- [32] 张金闯.高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D].北京:中国农业科学院,2019.ZHANG J C.Conformational changes and quality control of peanut protein during the high-moisture extrusion process [D].Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences,2019(in Chinese with English abstract).
- [33] 张金闯,魏益民,张波,等.组织化大豆蛋白生产工艺研究与应用进展[J].中国粮油学报,2015,30(10):135-139.ZHANG J C,WEI Y M,ZHANG B,et al.The research on production technology and application process of textured soybean protein[J].Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2015,30(10):135-139(in Chinese with English abstract).
- [34] 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.WANG Q,ZHANG J C.Research status, opportunities and challenges of high moisture extrusion technology[J].Journal of Chinese institute of food science and technology,2018,18(7):1-9(in Chinese with English abstract).
- [35] KYRIAKOPOULOU K,DEKKERS B,VAN DER GOOT A J.Plant-based meat analogues[M]//GALANAKIS C M.Sustainable meat production and processing. Amsterdam: Elsevier, 2019:103-126.

- [36] 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.
- [37] RUEDA J, KIL-CHANG Y, MARTINEZ-BUSTOS F. Functional characteristics of texturized defatted soy flour[J]. *AGROCIENCIA*, 2004, 38(1): 63-73.
- [38] NIEUWLAND M, GEERDINK P, BRIER P, et al. Food-grade electrospinning of proteins[J]. *Innovative food science & emerging technologies*, 2013, 20: 269-275.
- [39] 江连洲, 张鑫, 窦薇, 等. 植物基肉制品研究进展与未来挑战[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(8): 1-10. JIANG L Z, ZHANG X, DOU W, et al. Advance and challenges in plant-based meat[J]. *Journal of Chinese institute of food science and technology*, 2020, 20(8): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- [40] DOWNEY G, BURGESS K J. Texture studies on edible protein-fibres produced by a wet spinning technique. I. Fibres produced from casein and carrageenan[J]. *International journal of food science & technology*, 2007, 14(1): 21-31.
- [41] KRINTIRAS G A, GADEA DIAZ J, 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.
- [42] MANSKI J M, VAN DER GOOT A J, BOOM R M. Formation of fibrous materials from dense calcium caseinate dispersions[J]. *Biomacromolecules*, 2007, 8(4): 1271-1279.
- [43] 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.
- [44] 王崑, 杨领, 李学鹏, 等. TG酶对金线鱼鱼糜3D打印效果的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(6): 74-81. WANG W, YANG L, LI X P, et al. Effect of transglutaminase on 3D printing characteristics of *Nemipterus virgatus* surimi[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(6): 74-81 (in Chinese with English abstract).
- [45] LIU Z B, ZHANG M, BHANDARI B, et al. 3D printing: printing precision and application in food sector[J]. *Trends in food science & technology*, 2017, 69: 83-94.
- [46] KO H J, WEN Y X, CHOI J H, et al. Meat analog production through artificial muscle fiber insertion using coaxial nozzle-assisted three-dimensional food printing[J/OL]. *Food hydrocolloids*, 2021, 120: 106898 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106898>.
- [47] PUOLANNE E, HALONEN M. Theoretical aspects of water-holding in meat[J]. *Meat science*, 2010, 86(1): 151-165.
- [48] GRAÇA J, GODINHO C A, TRUNINGER M. Reducing meat consumption and following plant-based diets: current evidence and future directions to inform integrated transitions[J]. *Trends in food science & technology*, 2019, 91: 380-390.
- [49] DUQUE-ESTRADA P, KYRIAKOPOULOU K, DE GROOT W, et al. Oxidative stability of soy proteins; from ground soybeans to structured products[J/OL]. *Food chemistry*, 2020, 318: 126499 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126499>.
- [50] YANG X Q, ZHANG Y M. Expression of recombinant transglutaminase gene in *Pichia pastoris* and its uses in restructured meat products[J]. *Food chemistry*, 2019, 291: 245-252.
- [51] HERREMAN L, NOMMENSEN P, PENNING S, et al. Comprehensive overview of the quality of plant- and animal-sourced proteins based on the digestible indispensable amino acid score[J]. *Food science & nutrition*, 2020, 8(10): 5379-5391.
- [52] ZHANG J C, LIU L, JIANG Y R, 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/OL]. *Food hydrocolloids*, 2020, 99: 105311 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105311>.
- [53] JIA W Q, RODRIGUEZ-ALONSO E, BIANEIS M, et al. Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications[J/OL]. *Innovative food science & emerging technologies*, 2021, 68: 102636 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102636>.
- [54] SALGADO P R, MOLINA ORTIZ S E, PETRUCCELLI S, et al. Functional food ingredients based on sunflower protein concentrates naturally enriched with antioxidant phenolic compounds[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2012, 89(5): 825-836.
- [55] ELSOHAIFY S A, REFAAY T M, ZAYTOUN M A M. Physicochemical and functional properties of quinoa protein isolate[J]. *Annals of agricultural sciences*, 2015, 60(2): 297-305.
- [56] TAMAYO TENORIO A, KYRIAKOPOULOU K E, SUAREZ-GARCIA E, et al. Understanding differences in protein fractionation from conventional crops, and herbaceous and aquatic biomass; consequences for industrial use[J]. *Trends in food science & technology*, 2018, 71: 235-245.
- [57] HJELM L, MIELBY L A, GREGERSEN S, et al. Partial substitution of fat with rye bran fibre in Frankfurter sausages-bridging technological and sensory attributes through inclusion of collagenous protein[J]. *LWT-food science and technology*, 2019, 101: 607-617.
- [58] CÂMARA A K F I, OKURO P K, CUNHA R L D, et al. Chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage as a new fat substitute in emulsified meat products: technological, physicochemical, and rheological characterization[J/OL]. *LWT-food science and technology*, 2020, 125: 109193 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109193>.
- [59] ESPERT M, SALVADOR A, SANZ T. Cellulose ether oleogels obtained by emulsion-templated approach without additional thickeners[J/OL]. *Food hydrocolloids*, 2020, 109: 106085 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106085>.
- [60] SCHMIELE M, NUCCI MASCARENHAS M C C, DA SILVA

- BARRETTO A C, et al. Dietary fiber as fat substitute in emulsified and cooked meat model system[J]. *LWT-food science and technology*, 2015, 61(1): 105-111.
- [61] LÓPEZ-PEDROUSO M, LORENZO J M, GULLÓN B, et al. Novel strategy for developing healthy meat products replacing saturated fat with oleogels[J]. *Current opinion in food science*, 2021, 40: 40-45.
- [62] SANTOS M D, OZAKI M M, RIBEIRO W O, et al. Emulsion gels based on pork skin and dietary fibers as animal fat replacers in meat emulsions: an adding value strategy to byproducts [J/OL]. *LWT-food science and technology*, 2020, 120: 108895 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108895>.
- [63] MAO L K, MIAO S, YUAN F, et al. Study on the textural and volatile characteristics of emulsion filled protein gels as influenced by different fat substitutes[J]. *Food research international*, 2018, 103: 1-7.
- [64] JIMÉNEZ-COLMENERO F, COFRADES S, HERRERO A M, et al. Konjac gel fat analogue for use in meat products: comparison with pork fats[J]. *Food hydrocolloids*, 2012, 26(1): 63-72.
- [65] LI J, WANG Y T, JIN W P, et al. Application of micronized konjac gel for fat analogue in mayonnaise[J]. *Food hydrocolloids*, 2014, 35: 375-382.
- [66] 李晶. 冷冻影响脱乙酰魔芋葡甘聚糖凝胶的机制与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. LI J. The impact mechanism of freezing process on deacetylated konjac glucomannan gel and its application[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [67] KYRIAKOPOULOU K, KEPPLER J K, VAN DER GOOT A J. Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues[J/OL]. *Foods*, 2021, 10(3): 600 [2021-06-21]. <https://doi.org/10.3390/foods10030600>.
- [68] WU Y F G, CADWALLADER K R. Characterization of the aroma of a meatlike process flavoring from soybean-based enzyme-hydrolyzed vegetable protein [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2002, 50(10): 2900-2907.
- [69] WU Y F, BAEK H H, GERARD P D, et al. Development of a meat-like process flavoring from soybean-based enzyme-hydrolyzed vegetable protein (E-HVP) [J]. *Journal of food science*, 2000, 65(7): 1220-1227.
- [70] XIONG W F, REN C, LI J, et al. Enhancing the photostability and bioaccessibility of resveratrol using ovalbumin-carboxymethylcellulose nanocomplexes and nanoparticles [J]. *Food & function*, 2018, 9(7): 3788-3797.
- [71] LIANG H S, ZHOU B, HE L, et al. Fabrication of zein/quaternized chitosan nanoparticles for the encapsulation and protection of curcumin[J]. *RSC advances*, 2015, 5(18): 13891-13900.

Progress on structure design and development of plant-based meat products

CUI Bing, LI Jing, LIANG Hongshan, CHEN Yijie, LI Yan, LI Bin

*College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University/
Ministry of Education Key Laboratory of Environment Correlative Dietology, Wuhan 430070, China*

Abstract In order to meet the sustainability of future food supply and consumers' demand for nutrition and health, plant-based meat products have received continuous attention from the market in recent years. Although plant-based meat products with fibrous textures have been prepared, having the same nutrition and sensory attributes as animal meat tissues is the ultimate goal of structure design of plant-based meat products. We describes the structure and function of animal meat components, summarizes the raw material composition and processing technology of plant-based meat products, and compares the differences between plant-based meat products and animal meat. Finally, the direction that needs to be explored in the construction of plant-based meat products is proposed from the perspective of structure design including optimizing plant-based fibrosis technology, developing new protein resources, constructing adipose tissue and connective tissue equivalents, and regulating characteristics and flavors. It is expected to provide a reference for the development of novel plant-based meat products.

Keywords meat alternatives; animal meat; plant-based meat products; structure of organization; structure design; 3D printing

(责任编辑:赵琳琳)