

# 挤出对淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构与质构特性影响的研究进展

李琳<sup>1,2,3</sup>, 李晓玺<sup>2</sup>, 陈旭<sup>3</sup>, 何忠超<sup>2</sup>, 朱杰<sup>3</sup>, 闫景坤<sup>3</sup>, 袁建军<sup>1</sup>, 王宝贝<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>泉州师范学院海洋与食品学院 福建泉州 362000

<sup>2</sup>华南理工大学食品科学与工程学院 淀粉与植物蛋白深加工教育部工程研究中心

广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室 广州 510640

<sup>3</sup>东莞理工学院生命健康技术学院 食品营养健康工程与智能化加工研究中心 东莞市特色食品精准设计重点实验室  
中国轻工业健康食品开发与营养调控重点实验室 广东东莞 523808)

**摘要** 植物基营养健康食品已成为未来食品产业的发展方向以及国民健康饮食的重要需求。要研发植物基营养健康食品,就必须掌握加工过程中该类食品软物质的跨尺度结构变化规律及其对功能和特性的影响。本文在阐明营养健康食品跨尺度结构特征的基础上,分析植物基营养健康食品的创制途径与质构特性的调控机制。针对挤出加工技术的原理与应用,阐述挤出加工对淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构演变和质构特性影响的研究进展,指出相关研究领域应重点关注的基础科学问题,并对未来发展进行展望,以期提升植物基营养健康食品品质,全面推进该产业的发展提供参考。

**关键词** 淀粉; 植物蛋白; 挤出; 跨尺度结构; 质构特性

文章编号 1009-7848(2023)01-0397-12 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.01.038

## 1 营养健康食品体系的跨尺度结构特征

随着社会的发展和国民生活水平的不断提高,人们对食品营养与健康的关注程度与日俱增。通过调控食品中碳水化合物、蛋白质与脂质等主要组分的种类与组成及强化营养活性物质,可以达到提供优质碳水化合物、蛋白质、脂质和增加营养健康功能的目的,从而更好地对由膳食结构不合理引起的代谢性慢性疾病进行膳食干预。因此,创制美味可口、营养健康的食品已经成为现代食品产业发展“新常态”下的迫切需求<sup>[1-2]</sup>。

从软物质科学的视角来看,食品体系实质上是由多种营养组分基于分子相互作用形成的,具有从微观尺度(分子、分子聚集体等)、介观尺度(颗粒、乳液、胶粒、泡沫等分子团簇)到宏观尺度(固态、液态食品等织态结构)等跨尺度结构的软物质。根据物质材料结构与功能的构效关系,营养健康食品的功能特性主要取决于多种物质组分在加工过程中形成复合物的跨尺度结构,因此,要靶

向创制具有优良功能特性的营养健康食品,就必须基于不同尺度上的分子相互作用规律来精准诱导营养健康食品组分形成特定的跨尺度结构,从而保持和提升营养健康食品的品质功能,进而解决营养健康食品加工产业发展的技术瓶颈与关键问题,并实现食品科学领域营养健康食品的新突破。

## 2 植物基营养健康(仿生)食品的创制与质构特性调控

### 2.1 植物基营养健康(仿生)食品组分跨尺度的相互作用

植物基营养健康食品因其具有良好的营养健康调节功能、可持续生产等优势而蓬勃发展<sup>[3-5]</sup>,其中,具有不同营养健康功能的植物基仿生谷物食品和植物基仿生肉制品更加备受关注<sup>[6-7]</sup>。由于自然界中大米、小麦、玉米、马铃薯和豆类等谷物胚乳和动物肌肉组织均是以分子为组成单元,逐步组装形成聚合物,构建并分隔成不同尺度的细胞和组织,直至宏观尺度上形成谷粒和肌肉,并同步构造成能实现预期功能特性的植物和动物组织体系,该体系包含了从微观尺度(分子、分子聚集体

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172238)

第一作者: 李琳,男,博士,教授

E-mail: felinli@scut.edu.cn

等)、介观尺度(细胞、组织等)到宏观尺度(器官等)的跨尺度结构(图1),因此,通过仿生模拟谷物胚乳薄壁细胞中密集堆积的淀粉颗粒镶嵌在蛋白质基质中的特殊结构<sup>[8-9]</sup>、肌肉中肌原纤维蛋白形成的各向异性纤维或层状纤维结构,可以利用大米、小麦、玉米、马铃薯和豆类等谷物淀粉、非淀

粉多糖等碳水化合物与豆类、大米、小麦和玉米等植物蛋白的跨尺度相互作用及其跨尺度结构的演变,来延缓或者抑制淀粉消化性能及改变其凝胶质构特征<sup>[6,8-9]</sup>,创制出具有特定功能特性的植物基营养健康(仿生)食品。

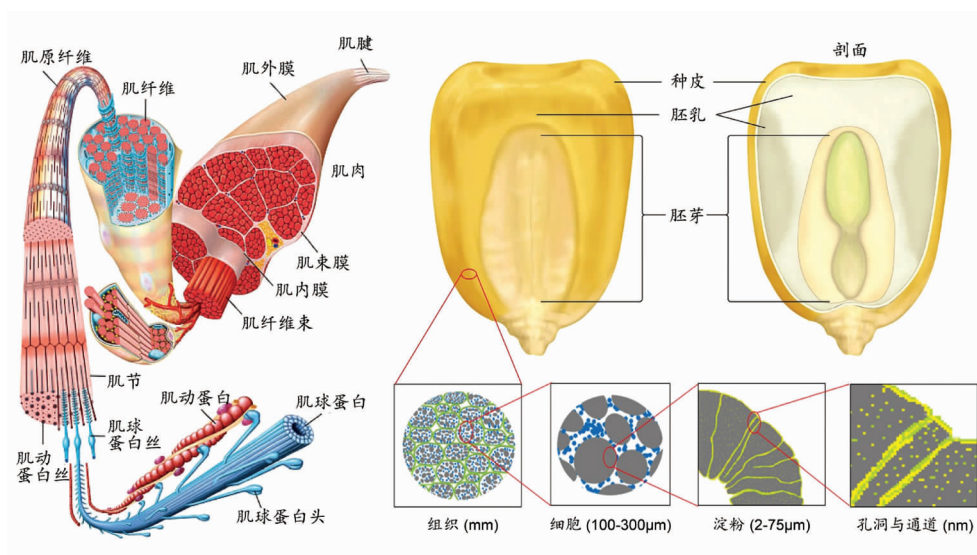


图1 肌肉及谷物(玉米)胚乳跨尺度结构<sup>[10-11]</sup>

Fig.1 Cross-scale structure of muscle and endosperm of grain (maize)<sup>[10-11]</sup>

众所周知,淀粉等碳水化合物与植物蛋白是植物基营养健康食品中的重要组分。通过调控淀粉与植物蛋白有关组分的跨尺度相互作用及其复合物的结构,可仿生设计具有特定功能特性的植物基营养健康仿生谷物食品和植物基营养健康仿生肉制品<sup>[6,10-11]</sup>。研究表明,牛奶中的脂肪球和酪蛋白的胶体性质,在产生其理想的质量属性方面,起着至关重要的作用,稳定的乳液体系有助于其乳白色外观和奶油质地。然而,当以藜麦蛋白和不同水解程度的淀粉降解产物糊精为模拟脂质来设计植物奶时,糊精会严重影响其乳化稳定性,且在无盐离子存在时,二者的相分离更明显,致使絮凝现象出现<sup>[12]</sup>。此外,由于植物蛋白相对于动物蛋白不易形成网络结构,且形成的蛋白网络结构较弱,使得植物基鸡蛋的强度、弹性和抗压缩性能降低。而淀粉可通过氢键和离子键与植物蛋白的跨尺度结构相互作用,促进形成更紧凑和高强度的结构,使其呈现出与鸡蛋烹饪后类似的质构特性,同时也延缓了淀粉的消化速度<sup>[13]</sup>。另外,对于植物基肉

制品而言,蛋白的纤维结构是肉制品独特质构的关键,而支链淀粉会促进植物蛋白的展开,直链淀粉则导致相分离,促进植物蛋白的自聚集和重新折叠,有利于分层结构形成<sup>[14]</sup>,因此,通过调控二者的结构与分子间跨尺度结构的相互作用可形成丰富的肌肉纤维结构。

由此可见,植物基营养健康(仿生)食品的创制仍需不断提升其感官品质,才能推动相关产业的发展,并提高消费者的接受程度。解决这一问题的核心策略是科学设计和有效调控碳水化合物与植物蛋白及其它食品组分的跨尺度结构相互作用,以诱导复合物的结构化,从而赋予其所需的特定感官特性。因此,随着对自然界中植物、动物食品原料组成及不同尺度结构与功能特性之间相互关系及作用机制的不断探究,通过控制淀粉等碳水化合物与植物蛋白等蛋白质两种重要组分的相互作用及其复合物跨尺度结构,在切实提升植物基营养健康(仿生)食品感官特性和营养功能特性的基础上,可以构建并研发出能够满足不同人群

需求的美味可口的植物基营养健康(仿生)食品,较好地促进植物基营养健康(仿生)食品产业的进一步发展。

## 2.2 食品质构特性的本质与调控关键

质构特性是营养健康食品特别是固态和半固态食品重要的感官品质,它既是由食品成分和组织结构决定的物理性能,也是在口腔咀嚼过程中食品对人体机械感觉受体的刺激而生产的多种感觉特性<sup>[15-18]</sup>。当食品进入人体口腔后,食品与口腔接触并发生相互作用,在牙齿和/或舌头施加的力和唾液润滑作用下,经咀嚼引起食品宏观上发生形变、破裂、微粒化、水化,介观上溶胶、凝胶、聚集、聚团及微观上分子降解与重排、聚集体解体与重组等,继而触发人体机械感觉受体的刺激响应而产生的多种感觉特性,因此,从本质上说,食品的质构特性是复杂的物理、化学与生理过程的宏观表征。

显然,就生理过程而言,质构特性主要取决于食品在牙齿和/或舌头施加的力和唾液润滑作用下力学性能、流变性能和表面性能的变化。而大量的研究表明<sup>[18]</sup>,不论是物化过程还是生理过程,其力学性能、流变性能和表面性能在外界环境温度、力和介质作用下的变化均受控于食品的跨尺度结构及其在(口腔)加工中的动态变化。同样地,对于植物基营养健康(仿生)食品来说,其最终的跨尺度结构是由主要组分淀粉与植物蛋白分子在(口腔)加工过程中基于分子间共价键和非共价键相互作用重组而成的。也就是说,在食品加工过程中,通过控制食品加工条件,诱导和强化淀粉分子与植物蛋白分子的相互作用,在淀粉与植物蛋白及其复合体系中形成特定的跨尺度结构,是实现植物基营养健康(仿生)食品质构特性调控的关键。

## 3 挤出加工对淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构与质构的影响

事实上,学者们已通过各种加工技术诱导淀粉与植物蛋白相互作用,设计具备理想性质的植物基营养健康(仿生)食品。包括通过高压均质处理以形成适宜的植物蛋白颗粒或乳滴,这有利于匹配牛奶的流变特性。此外,高静压处理能够促

进淀粉和蛋白凝胶体系形成,而淀粉在体系中并未糊化且充当填充剂的作用,这就提高了蛋白质的结构强度,二者都有利于低血糖指数凝胶食品的制备<sup>[19]</sup>。此外,还有通过物理、化学或生物改性技术预处理淀粉或植物蛋白,以更好地诱导二者的结合与相互作用,从而获得优异的胶凝性、消化性、热稳定性、机械特性、营养特性和质构特性等的淀粉与蛋白的复合物;或是后处理淀粉与植物蛋白复合物,以稳定或加强二者的多尺度相互作用,更好地服务于植物基营养健康(仿生)食品的生产。虽然不同的加工技术在制备淀粉-植物蛋白复合物中都展现出各自独特的工艺优势,但是,挤出加工技术在淀粉和植物蛋白质重构肌肉纤维结构、重组米凝胶结构植物基营养健康(仿生)食品设计中,都扮演着重要且无法替代的角色。因此,有必要明确挤出加工过程创制植物基营养健康(仿生)食品中,对淀粉与植物蛋白在不同尺度下的相互作用及其质构特性的影响。

### 3.1 食品挤出加工技术原理与应用

食品挤出加工过程主要是利用流体的拖拽流原理,在热、剪切力和压力的作用下,强迫碳水化合物、蛋白质、脂质、水分及其微量营养物质等食品原料在有限空间内进行混合、揉制、均质、剪切、蒸煮、熔融、脱水、成型等连续流动的食品加工过程<sup>[20-21]</sup>。在本质上,该过程就是通过螺杆与料筒之间形成的生物反应器,使物料在热机械效应作用下短时间内发生物理与化学变化,继而通过多样的模具,来生产不同尺度结构特征且具有改变、强化或赋予特定功能特性的各类食品的过程<sup>[20]</sup>。由于该技术是通过挤出机螺杆结构与出口模具结构的多元化设计,利用热、剪切力、压力等多种物理场耦合作用来控制食品组分由固态向高黏态或塑性体系转变,通过改变食品组分的相互作用,在特定的流动方向及空间内进行食品组织结构化,并在最终挤出后迅速重排、凝胶、结晶、膨化和成型的加工方式,故而特别适合从分子、分子间复合组装、分子团簇、团簇聚集等微观取向及聚团、凝胶、结晶、纤维化等介观聚集和宏观织态化等跨尺度角度对食品的组织结构、品质特性进行重构与设计,从而达到满足不同功能特性需求的植物基营养健康(仿生)食品的创制。

食品挤出加工技术是一种重要的高效清洁生产技 术,具有生产效率高,能源效率高,成本低,无废水等独特优势;其高温高压高剪切力的加工环境条件及灵活可控的操作参数,赋予其良好的生产效率及能源效率;而从进料口到模口一体化的生产工艺流程有效避免废水的产生,并显著降低了生产成本。此外,其个性化设计的挤出螺杆和模具可使其创制出多样化的营养健康食品。因此,食品挤出加工技术被广泛地应用于膨化食品、即食谷物、糖果制品、组织化植物蛋白、面食、早餐麦片、饼干、婴儿食品、休闲食品、变性淀粉、固体饮料等相关食品的生产<sup>[21-22]</sup>。近年来,食品的挤出技术因在获得高品质清洁标签的植物基营养健康(仿生)食品生产中发挥的作用日益凸显而备受关注<sup>[23]</sup>。

### 3.2 挤出加工对淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构的影响

淀粉与蛋白质均具有复杂的跨尺度结构。淀粉根据尺寸可分为直链淀粉和支链淀粉的精细结构、短程有序结构、晶体结构、层状结构、聚集体结构等<sup>[24]</sup>。蛋白质的跨尺度主要结构包括一、二、三、四级结构等。在复杂的挤出加工过程中,由于高温、剪切、压力和水分的存在,淀粉与蛋白质的各尺度结构会发生不同程度的改变(见表1),对于淀粉,包括淀粉分子链的降解,有序化结构与无序化结构之间的转变,产生多孔网络的宏观结构等<sup>[25-26]</sup>;而对于植物蛋白,包括蛋白质肽链的解体与展开,共价键和次级键的断裂与重连,空间结构和构象的坍塌与重构,产生纤维的宏观构象等<sup>[27-29]</sup>。

表1 淀粉和蛋白质在挤出加工过程中跨尺度结构的变化

Table 1 The evolution in cross-scale structure of starch and protein during extrusion

原料	跨尺度结构	挤出加工下的结构演变	参考文献
淀粉	分子链结构	直链淀粉影响较小;支链淀粉糖苷键断裂,分子量下降产生低分子量组分,链长分布上短链增多,长链减少	[30], [31]
	短程有序结构	淀粉有序度降低,直链淀粉螺旋结构被破坏,支链淀粉双螺旋结构解离	[32]~[34]
	结晶结构	部分晶体结构转化为无定形状态,导致结晶度下降,并在冷却过程又上升	[35]~[37]
	分层结构	半结晶层、结晶层和非晶层的厚度发生变化,半结晶分层结构被破坏或消失	[25], [38]
	颗粒结构	淀粉颗粒完全被破坏,并且当挤出物离开挤出机时形成多孔蜂窝结构	[25], [26], [39]
蛋白	一级结构	蛋白质肽链发生断裂,分子量下降;原有二硫键和肽键断裂并形成新的二硫键或交联形成异肽键	[40], [41]
	二级结构	氢键遭到破坏, $\alpha$ 螺旋 $\beta$ 折叠 $\beta$ 转角及无规卷曲结构的含量受挤出条件影响发生不同程度的增加或降低	[42], [43]
	三级结构	蛋白分子链展开及解盘绕,活性反应位点构象改变;疏水侧链暴露,各种次级键发生不同程度的破坏	[44], [45]
	四级结构	部分疏水作用力消失,寡聚蛋白分离,反应位点解离	[46], [47]

在淀粉与植物蛋白共同存在时,挤出加工不仅导致淀粉-淀粉或蛋白质-蛋白质之间的相互作用,还会使得淀粉与蛋白质在不同尺度上发生相互作用,最终形成具有跨尺度结构特征的复合物。研究表明,淀粉和蛋白质之间主要发生3种类型的相互作用<sup>[48]</sup>:一是蛋白质在淀粉颗粒表面的渗透和吸附<sup>[49]</sup>,这不仅影响淀粉的糊化及其颗粒结构的进一步膨化,还影响蛋白质肽链的展开与三维网络的形成;二是蛋白质分子之间自聚集形成连续相,从而使得挤出复合物之间发生分相现象;

三是淀粉分子和蛋白质之间会形成共价和/或非共价键键合<sup>[50-51]</sup>,形成半互穿、互穿网络结构或弱凝胶结构等。在这些分子间相互作用的基础上,淀粉与植物蛋白发生从微观至介观再到宏观尺度上的跨尺度结构演变,最终形成新的跨尺度结构。Chen等<sup>[14]</sup>将直链/支链淀粉与大豆分离蛋白共挤出时发现,蛋白质主链上的氨基和侧链上的供电子基团会与直链淀粉上的羟基形成分子间氢键,而支链淀粉较强的水结合能力则会促进蛋白质分子之间形成氢键并形成各向异性纤维结构;在介

观尺度上,直链淀粉填充在蛋白质网络结构中,而支链淀粉则与蛋白质相分离,聚集在蛋白质基质的部分区域中。最终,直链淀粉/大豆分离蛋白共挤物呈现分层纤维状态,而支链淀粉/大豆分离蛋白则呈现致密的分层纤维结构。Wang等<sup>[52]</sup>在不同比机械能下挤出谷蛋白和大米淀粉混合物,发现淀粉和蛋白质之间形成氢键,并且是在谷蛋白中酪氨酸C1上形成。此外,谷蛋白与淀粉挤出降解形成的小分子糖发生了美拉德反应,发生了氨基和羟基的交联。最终,由于谷蛋白的破坏、变性、融合及其与大米淀粉的交联,产生了致密且均匀的宏观尺度结构。值得注意的是,挤出操作参数是调控淀粉与植物蛋白多尺度结构变化和跨尺度结构重构的关键<sup>[20,22,53]</sup>,控制二者发生的糊化、交联、复合、降解、美拉德反应、凝沉、凝胶、聚集等反应类型、速率和程度<sup>[54-55]</sup>,从而改变淀粉与植物蛋白复合物的结构。

### 3.3 挤出加工对淀粉与植物蛋白复合物质构特性的影响

食品的质构特性与感官属性有关,并取决于产品的结构特征<sup>[56]</sup>。目前,研究学者主要聚焦在高水分挤出过程形成仿生肉结构,即在机械效应和热效应作用下赋予的纤维结构,其具有与肉类组织相似的嫩度、咀嚼度、硬度等质构特性<sup>[57-58]</sup>,同时,还关注低水分下挤出过程形成仿生谷物结构,包括蓬松多孔结构和凝胶结构,其具有与谷物相似的硬度、脆度、黏性等质构特性<sup>[59-61]</sup>。

在高水分挤出的情况下,植物蛋白在高温与剪切的作用下通过进料区、混合区、熔融区和冷却区形成具有各向异性的纤维结构,产生与肉制品相似的咀嚼度、嫩度、弹性、硬度等质构特性<sup>[62]</sup>。而在挤出过程中,蛋白质和淀粉分子之间的相互作用在制备具有丰富肉样纤维结构的植物蛋白基肉类替代品和改善其质构特性中发挥了重要作用<sup>[63-64]</sup>。如前所述,挤出过程淀粉与植物蛋白之间发生相互作用,从而影响蛋白质挤出纤维结构的形成、排列、紧密程度,导致最终产品所产生的质构特性迥异。Chen等<sup>[14,65]</sup>发现,支链淀粉显著提高了豌豆蛋白纤维化程度,从而降低了挤出复合物的硬度、弹性、耐嚼性和抗拉力。这归咎于支链淀粉有利于纤维结构沿挤出方向的形成,致使形成仿生肉制品

的柔软质地。而直链淀粉的加入,使得其与伸展的植物蛋白分子在挤出过程中线性排列,并形成直链淀粉/植物蛋白复合物,阻碍蛋白质分子之间的结合和聚合,从而导致更高的表面张力,致使纤维结构难以形成,进而降低挤出复合物的硬度、弹性和咀嚼度。此外,淀粉能促进植物蛋白之间疏水相互作用强度<sup>[66]</sup>,而疏水相互作用和二硫键交互作用是形成蛋白纤维状结构的主要作用力,并且,二者之间的相互作用促使三维网络结构形成,促进了小分子量蛋白亚基转化为大分子量蛋白亚基,从而提高了蛋白质结构的有序程度,改善了挤出复合物的硬度和咀嚼度。

在低水分挤出情况下,气泡成核和生长、聚结、收缩过程是形成挤出复合物膨化结构的重要科学基础<sup>[67]</sup>,并在温度和压力的剧变下,产生多孔蜂窝结构,最后形成特定硬度、酥脆性、颗粒度、摩擦感、润湿性等质构特性的挤出膨化谷物产品<sup>[33,68]</sup>。膨胀率、堆积密度、孔壁大小及多少等物理性能,与其表现的质构特性息息相关<sup>[18]</sup>,并受挤出过程操作参数、原料的性质和原料之间的相互作用影响<sup>[69-70]</sup>。相比于单一成分挤出,淀粉和植物蛋白混合物的热性能发生显著变化,而挤出复合物的玻璃化转变行为在最终产品的质构特性上起着重要作用。当淀粉单独挤出时,其在熔融后形成的黏弹性质会在冷却时转变为玻璃态阶段,此时,气泡停止生长,从而形成特定的结构及相应的脆性<sup>[26]</sup>。然而当有蛋白质网络形成时,其可以阻碍无定形淀粉颗粒的水合,并防止它们在挤出前过度膨胀。然而,在热机械作用下,植物蛋白分子会自聚集从而导致淀粉和蛋白质之间的相分离或和淀粉植物蛋白出现复合形态,这将导致挤出复合物的脆性增加,硬度减小<sup>[71]</sup>。

## 4 挤出加工过程中淀粉与植物蛋白复合物结构-功能关系的剖析

由于淀粉与植物蛋白挤出加工创制植物基营养健康(仿生)食品涉及到淀粉与植物蛋白种类组成与多尺度结构、挤出加工条件(包括挤出温度、组分水分与比例、螺杆结构、模具几何形状、螺杆转速等)等多种因素的影响,且淀粉与植物蛋白在挤出加工过程中还涉及复杂的分子之间跨尺度相

互作用,因此,如何有效调控挤出加工过程来构建具有合适跨尺度结构,并获得具有一定质构特性的挤出加工食品仍面临极大挑战<sup>[72-73]</sup>。

应该注意到,自然界中植物基食品存在的跨尺度结构已经进化了数百万年,它们在外界环境条件下已实现了最优化的功能特性。然而,由于自然界的能量有限,分子间的相互作用在构建(大)超分子等跨尺度结构中只是起着明显的基础性作用<sup>[74]</sup>,而外界条件引发的分子自组装形成过程才是构建这些复杂体系跨尺度结构的关键。因此,要获得具有良好质构特性的植物基营养健康(仿生)食品,就必须选择合适的淀粉与植物蛋白,通过控制挤出加工条件,诱导与调控两种分子之间的跨尺度相互作用,以构建可以赋予淀粉与植物蛋白复合物不同功能特性的跨尺度结构。

实质上,挤出加工创制植物基营养健康(仿生)食品的过程是淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构形成的复杂物理、化学过程。就是说,通过施加合适的挤出加工条件,诱导淀粉与植物蛋白分子间跨尺度相互作用,继而控制组分分子内降解、重排及分子间缔合、组装、结晶、聚集等分子运动行为,以构建相应的跨尺度结构,创制具有特定功能特性的淀粉与植物蛋白复合物,实现对植物基营养健康(仿生)食品功能特性的精准调控。在此过程中,特定功能特性主要取决于淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构的动态演变,同时,淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构的形成与演变受控于挤出加工过程条件、淀粉与植物蛋白的结构及淀粉与植物蛋白跨尺度相互作用,并遵循复合物跨尺度结构动态转变机制。

然而,值得注意的是,当前对食品挤出加工过程淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构与功能特性关系的研究还存在一些问题:首先,要建立起淀粉与植物蛋白结构、挤出加工条件、复合物跨尺度结构与其挤出加工食品质构等功能特性之间的有效关联;其次,要从食品跨尺度结构在挤出加工过程中热机械力场作用下的动态变化与匹配性出发,来明晰挤出加工过程中,淀粉与植物蛋白分子相互作用及复合物跨尺度结构形成的影响;再者,要更好地了解复合物跨尺度结构在挤出加工过程中发生相应的力学、流变学和表面特性的响应变化

规律。因此,针对最终呈现特定质构等功能特性的植物基营养健康(仿生)食品,必须以淀粉与植物蛋白多尺度结构与跨尺度相互作用行为、复合物跨尺度结构演变为突破口,融入机械力学、流体力学、高分子化学与物理、有机化学、现代结构分析等多学科知识,同时有机结合食品质构特性动态分析和生理感官评价理论与技术等进行深入剖析,才能探明挤出加工过程对淀粉与植物蛋白复合物的质构等功能特性的影响规律,建立相应的植物基营养健康(仿生)食品特定质构等功能特性靶向创制方法与调控机制。

## 5 淀粉与植物蛋白挤出加工过程的基础科学问题

### 5.1 淀粉与植物蛋白挤出加工过程中跨尺度相互作用的动态演变规律问题

实现植物基营养健康(仿生)食品特定功能特性靶向创制的关键之一,就是在挤出加工过程中,调控其不同尺度的主要成分(淀粉与植物蛋白)之间的相互作用,从而构建具有特定功能特性的植物基营养健康(仿生)食品的跨尺度结构。实际上,在挤出加工过程中,由于一定热机械物理场的作用,不同尺度结构的淀粉与植物蛋白会发生物理相变、交联反应、美拉德反应等一系列复杂的物理化学变化,导致不同尺度结构的淀粉与植物蛋白分子之间发生多尺度结构的相互作用,包括解聚、构象转变、共价键合、结构重组、限域空间织态化等,从而引起从微观至介观再到宏观尺度等跨尺度相互作用的动态演变,并最终形成新的跨尺度结构。因此,若要获得植物基营养健康(仿生)食品的功能特性靶向创制技术,就必须深入探讨并系统掌握在不同挤出加工热机械物理场作用下,具有不同尺度结构的淀粉、植物蛋白以及淀粉与植物蛋白复合物在跨尺度水平上相互作用的动态演变规律,进而以此调节不同尺度组分(淀粉与植物蛋白)分子内以及分子之间的跨尺度相互作用行为,最终控制分子链、聚集态、织态结构等跨尺度结构的形成。

### 5.2 淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构与质构特性之间的关系问题

淀粉与植物蛋白复合物的质构特性是由其不

同尺度结构的化学组分内部、组分之间相互作用以及跨尺度组织结构所决定的物理性质,也是通过口腔等人体部位接触而触发人体机械感觉受体的刺激响应,这是一个复杂的物理、化学与生理过程,是体现这类复合物感官性质的重要指标之一,因而是食品科技领域的研究重点。对于从挤压加工过程获得的淀粉与植物蛋白复合物来说,体现对其质构特性影响的通常包括两个方面:其一,是挤出加工过程由于不同尺度结构组分内部和之间相互作用所形成复合物的跨尺度结构动态演变的影响;其二,是口腔咀嚼过程由于唾液浸润、剪切搅拌、酶降解等作用,导致跨尺度结构动态变化的影响,虽然这两者在作用力的数量级上有明显的差异,但是,它们都是决定淀粉与植物蛋白复合物发生力学、流变、表面性质等质构特性变化的核心因素。因此,要有效调控淀粉与植物蛋白复合物的质构特性,并阐明其调控机制,就必须系统分析具有不同跨尺度结构特征的淀粉与植物蛋白复合物在挤压加工过程和/或口腔咀嚼过程中,由于热机械物理场施加和/或剪切力、唾液、酶等的作用导致的跨尺度结构和质构特性的变化,建立淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构演变与质构特性之间的关系。

### 5.3 淀粉与植物蛋白复合物挤出加工条件-跨尺度结构-功能特性之间的关联性问题

因为植物基营养健康(仿生)食品的功能特性主要取决于淀粉与植物蛋白相互作用形成的特定跨尺度结构,在挤出加工过程中,淀粉与植物蛋白不同尺度结构组分之间和跨尺度的相互作用与组装,以及跨尺度结构的形成等,都受制于挤出加工过程条件,所以,要真正有效靶向调控植物基营养健康(仿生)食品的功能特性,就必须利用包括神经网络方法在内的数学手段来建立挤出加工条件、淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结构及其功能特性之间的关系模型,并以此作为获得植物基营养健康(仿生)食品功能特性靶向创制的分子设计依据。也就是说,从食品软物质材料的角度看,当确定了食品的预期功能特性后,通过分子设计就能确定其所需的淀粉与植物蛋白复合物跨尺度结

构,从而准确地选择挤出加工条件、淀粉与植物蛋白种类和数量等,并进一步诱导这两类分子不同尺度之间及其跨尺度的相互作用与组装,达到该复合物的跨尺度结构重构,以期真正实现食品预期功能特性的靶向调控。

## 6 展望

通过对上述基础科学问题的分析可知,为了提升挤出加工获得的植物基营养健康(仿生)食品的质构特性,未来的科学研究应从挤出加工过程中,淀粉与植物蛋白跨尺度相互作用及跨尺度结构调控等层面入手,明晰挤出加工条件、淀粉与植物蛋白跨尺度相互作用、跨尺度结构及质构特性之间的关系和相互影响机制,充分认识植物基营养健康(仿生)食品挤出加工过程的复杂物理、化学过程本质,从跨尺度相互作用层面揭示挤出加工过程中与复合物质构特性相关的跨尺度结构的形成途径,建立可行的优良质构特性的植物基营养健康(仿生)食品的创制方法,为植物基营养健康(仿生)食品靶向创制提供理论依据和技术支撑。

兼顾感官品质与营养健康功能的美味可口的植物基营养健康(仿生)食品已经成为人类的重要需求,也是未来食品产业亟待解决的关键技术问题。因此,从制约植物基营养健康(仿生)食品重要感官品质(质构等)功能特性提升,及其食品跨尺度结构在挤出加工过程中的动态形成与变化这一关键基础科学问题出发,以植物基营养健康(仿生)食品主要组分(淀粉与植物蛋白)跨尺度结构在挤出加工过程中的形成与调控为切入点,深入探讨挤出加工调控植物基营养健康(仿生)食品质构等功能特性的科学与技术问题,将具有重要的研究价值和实际指导意义,其研究结果可促进新型植物基营养健康(仿生)食品质构等功能特性的分子设计和靶向创制,尤其为挤出加工创制优良感官质构等功能特性的新型植物基营养健康(仿生)食品提供理论依据,对促进食品科学的发展和营养健康食品产业国际竞争力的提升具有十分重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] GRANATO D, BARBA F J, BURSAC K D, et al. Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2020, 11: 93–118.
- [2] SMALL D M, DIFELICEANTONIO A G. Processed foods and food reward[J]. Science, 2019, 363(6425): 346–347.
- [3] O'KEEFE S J D. Plant-based foods and the microbiome in the preservation of health and prevention of disease[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2019, 110(2): 265–266.
- [4] MORIN É, MICHAUD -LÉTOURNEAU I, COU-TURIER Y, et al. A whole-food, plant-based nutrition program: Evaluation of cardiovascular outcomes and exploration of food choices determinants [J]. Nutrition, 2019, 66: 54–61.
- [5] KUMAR A, MOSA K A, JI L, et al. Metabolomics -assisted biotechnological interventions for developing plant-based functional foods and nutraceuticals[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(11): 1791–1807.
- [6] BENIWAL A S, SINGH J, KAUR L, et al. Meat analogs: Protein restructuring during thermomechanical processing[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 1221–1249.
- [7] DO D T, HARJINDER S, INDRAWATI O, et al. Biomimetic plant foods: Structural design and functionality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 82: 46–59.
- [8] YU W W, TAN X L, ZOU W, et al. Relationships between protein content, starch molecular structure and grain size in barley[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 155: 271–279.
- [9] XU H, ZHANG G. Slow digestion property of microencapsulated normal corn starch[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 60(1): 99–104.
- [10] 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.
- [11] DHITAL S, BRENNAN C, GIDLEY M J. Location and interactions of starches in planta: Effects on food and nutritional functionality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 93: 158–166.
- [12] LINGIARDI N, GALANTE M, DE SANCTIS M, et al. Are quinoa proteins a promising alternative to be applied in plant-based emulsion gel formulation?[J]. Food Chemistry, 2022, 394: 133485.
- [13] LU Z, LIU Y, LEE Y E J, et al. Effect of starch addition on the physicochemical properties, molecular interactions, structures, and *in vitro* digestibility of the plant-based egg analogues[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134390.
- [14] CHEN Q L, ZHANG J C, ZHANG Y J, et al. Protein -amylose/amylopectin molecular interactions during high -moisture extruded texturization toward plant-based meat substitutes applications [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107559.
- [15] PASCUA Y, KOÇ H, FOEGEDING E A. Food structure: Roles of mechanical properties and oral processing in determining sensory texture of soft materials[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2013, 18(4): 324–333.
- [16] SCHOLTEN E. Composite foods: from structure to sensory perception[J]. Food & Function, 2017, 8(2): 481–497.
- [17] VLIET T, AKEN G, JONGH H H J, et al. Colloidal aspects of texture perception[J]. Advances in Colloid & Interface Science, 2009, 150(1): 27–40.
- [18] FOEGEDING E A, STIEGER M, VELDE F. Moving from molecules, to structure, to texture perception[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 31–42.
- [19] SIM S Y J, MORARU C I. High-pressure processing of pea protein-starch mixed systems: Effect of starch on structure formation[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(2): e13352.
- [20] SINGH B, SHARMA C, SHARMA S. Fundamentals of extrusion processing[M]. India: New India Publishing Agency-Nipa, 2017: 1–46.
- [21] 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.
- [22] OFFIAH V, KONTOGIORGOS V, FALADE K O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(18): 2979–2998.



- [23] ARORA B, YOON A, SRIRAM M, et al. Reactive extrusion: A review of the physicochemical changes in food systems[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 64: 102429.
- [24] CHI C D, LI X X, HUANG S X, et al. Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 154–168.
- [25] HUANG X Y, LIU H S, MA Y, et al. Effects of extrusion on starch molecular degradation, order-disorder structural transition and digestibility—A review[J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2538.
- [26] YE J P, HU X T, LUO S J, et al. Properties of starch after extrusion: A review[J]. *Starch – Stärke*, 2018, 70(11/12): 1700110.
- [27] 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]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105311.
- [28] ZHANG J, LIU L C, LIU H., et al. Research advances on food extrusion equipment, technology and its mechanism[J]. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33: 275–283.
- [29] CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B. Chemical cross-linking and molecular aggregation of soybean protein during extrusion cooking at low and high moisture content[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2011, 44(4): 957–962.
- [30] GUHA M, ZAKI UDDIN A S. Molecular degradation of starch during extrusion cooking of rice[J]. *International Journal of Food Properties*, 2002, 5(3): 509–521.
- [31] LIU W C, HALLEY P J, GILBERT R G. Mechanism of degradation of starch, a highly branched polymer, during extrusion[J]. *Macromolecules*, 2010, 43(6): 2855–2864.
- [32] DONG Y Q, WANG B, FANG Y X, et al. Effect of different rotational speeds of the extruder on the structure of corn starch[J]. *Starch – Stärke*, 2022, 74(3/4): 2100234.
- [33] 董宇晴. 挤压对几种淀粉多尺度结构和理化性质影响的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- DONG Y Q. Effect of extrusion on multi-scale structure and physicochemical properties of several starches[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [34] KOWALSKI R J, HAUSE J P, JOYNER M H, et al. Waxy flour degradation – Impact of screw geometry and specific mechanical energy in a co-rotating twin screw extruder[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 688–696.
- [35] MITRUS M, WÓJTOWICZ A, ONISZCZUK T, et al. Effect of processing conditions on microstructure and pasting properties of extrusion-cooked starches[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2017, 13(6): 20160287.
- [36] SONG D L, THIO Y S, DENG Y L. Starch nanoparticle formation via reactive extrusion and related mechanism study[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 85(1): 208–214.
- [37] LIU Y F, CHEN J, WU J Y, et al. Modification of retrogradation property of rice starch by improved extrusion cooking technology[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 213: 192–198.
- [38] 徐捍山. 挤出协同多酚分子相互作用调控大米淀粉消化性能和糊性质的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- XU H S. Understanding the digestibility and paste properties of rice starch subjected to extrusion processing and polyphenol molecular interaction complex [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [39] ALI S, SINGH B, SHARMA S. Impact of feed moisture on microstructure, crystallinity, pasting, physico-functional properties and *in vitro* digestibility of twin-screw extruded corn and potato starches[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2019, 74(4): 474–480.
- [40] GAO Y X, SUN Y, ZHANG Y, et al. Extrusion modification: Effect of extrusion on the functional properties and structure of rice protein[J]. *Processes*, 2022, 10(9): 1871.
- [41] SCHMID E M, FARAHNAKY A, ADHIKARI B, et al. High moisture extrusion cooking of meat analogs: A review of mechanisms of protein texturization[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(6): 4573–4609.
- [42] ZHOU L Y, YANG Y, REN H B, et al. Structural changes in rice bran protein upon different extrusion

- temperatures: A raman spectroscopy study[J]. *Journal of Chemistry*, 2016, 2016: 6898715.
- [43] ZHANG B, KANG X M, CHENG Y H, et al. Impact of high moisture contents on the structure and functional properties of pea protein isolate during extrusion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 127: 107508.
- [44] QI P X, ONWULATA C I. Physical properties, molecular structures, and protein quality of texturized whey protein isolate: Effect of extrusion moisture content[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(5): 2231–2244.
- [45] ZHANG Y Y, HE Z J, XU M J, et al. Physicochemical properties and protein structure of extruded corn gluten meal: Implication of temperature[J]. *Food chemistry*, 2023, 399: 133985.
- [46] SUN C X, FU J L, CHANG Y Y, et al. Structure design for improving the characteristic attributes of extruded plant-based meat analogues[J]. *Food Biophysics*, 2022, 17(2): 137–149.
- [47] ZHANG Z Y, ZHANG L J, HE S D, et al. High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: A review[J]. *Food Reviews International*, 2022: 1–36. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2024223>
- [48] KUMAR L, BRENNAN M A, MASON S L, et al. Rheological, pasting and microstructural studies of dairy protein–starch interactions and their application in extrusion-based products: A review[J]. *Starch – Stärke*, 2017, 69(1/2): 1600273.
- [49] KETT A P, CHAURIN V, FITZSIMONS S M, et al. Influence of milk proteins on the pasting behaviour and microstructural characteristics of waxy maize starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(2): 661–671.
- [50] SINGH J, DARTOIS A, KAUR L. Starch digestibility in food matrix: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(4): 168–180.
- [51] SINGH J, KAUR L, SINGH H. Food microstructure and starch digestion[J]. *Advances in Food and Nutrition Research*, 2013, 70: 137–179.
- [52] WANG L S, DUAN Y M, TONG L F, et al. Insights into the interaction mechanism of glutelin and rice starch during extrusion processing: The role of specific mechanical energy[J]. *Food Chemistry*, 2022, 405(Pt A): 134850.
- [53] ZHANG B, ZHANG Y Q, DREISOERNER J, et al. The effects of screw configuration on the screw fill degree and specific mechanical energy in twin-screw extruder for high-moisture texturised defatted soybean meal[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 157: 77–83.
- [54] BÜHLER J M., SCHLANGEN M, MÖLLER A C, et al. Starch in plant-based meat replacers: A new approach to using endogenous starch from cereals and legumes[J]. *Starch – Stärke*, 2022, 74(1/2): 2100157.
- [55] LI S J, WEI Y M, FANG Y Q, et al. DSC study on the thermal properties of soybean protein isolates/corn starch mixture[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, 115(2): 1633–1638.
- [56] FOO W T, LIONG M T, EASA A M. Textural and structural breakdown properties of selected hydrocolloid gels[J]. *Food Research International*, 2013, 52(1): 401–408.
- [57] HE J, EVANS N M, LIU H Z, et al. A review of research on plant-based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(5): 2639–2656.
- [58] DEKKERS B L, BOOM R M, GOOT A J. Structuring processes for meat analogues[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 81: 25–36.
- [59] FEDERICI E, JONES O G, SELLING G W, et al. Effect of zein extrusion and starch type on the rheological behavior of gluten-free dough[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 91: 102866.
- [60] ZHANG W B, HUANG Q C, YANG R J. Gluten-free quinoa noodles: Effects of intermediate moisture extrusion and soy protein isolates supplement on cooking quality and *in vitro* digestibility[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(7): 4356–4367.
- [61] FU L L, ZHU J, ZHANG S Y, et al. Hierarchical structure and thermal behavior of hydrophobic starch-based films with different amylose contents[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 181: 528–535.
- [62] LIN Q Q, PAN L B, DENG N H, et al. Protein digestibility of textured-wheat-protein (TWP) -based meat analogues: (I) Effects of fibrous structure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 130: 107694.
- [63] YOUNIS K, ASHFAQ A, AHMAD A, et al. A critical review focusing the effect of ingredients on

- the textural properties of plant-based meat products [J]. *Journal of Texture Studies*, 2022: 1–18. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12704>.
- [64] DAY L, SWANSON B G. Functionality of protein-fortified extrudates [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2013, 12(5): 546–564.
- [65] CHEN Q L, ZHANG J C, ZHANG Y J, et al. Rheological properties of pea protein isolate-amylose/ amylopectin mixtures and the application in the high-moisture extruded meat substitutes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106732.
- [66] 关家乐. 不同淀粉对高水分组织花生蛋白品质影响及机理研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2022.
- GUAN J L. Effects of different starches on qualities and mechanisms of high-moisture tissue peanut[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2022.
- [67] PURLIS E, CEVOLI C, FABBRI A. Modelling volume change and deformation in food products/processes: An overview[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 778.
- [68] DALBHAGAT C G, MAHATO D K, MISHRA H N. Effect of extrusion processing on physicochemical, functional and nutritional characteristics of rice and rice-based products: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 85: 226–240.
- [69] HELLEMANS T, NEKHUZHIGA H, BOCK-STAELE F, et al. Variation in amylose concentration to enhance wheat flour extrudability[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 95: 102992.
- [70] TÉLLEZ –MORALES J A, HERMAN –LARA E, GÓMEZ –ALDAPA C A, et al. Techno-functional properties of the starch-protein interaction during extrusion-cooking of a model system (corn starch and whey protein isolate)[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2020, 132: 109789.
- [71] PHILIPP C, OEY I, SILCOCK P, et al. Impact of protein content on physical and microstructural properties of extruded rice starch-pea protein snacks[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 212: 165–173.
- [72] EMIN M A, QUEVEDO M, WILHELM M, et al. Analysis of the reaction behavior of highly concentrated plant proteins in extrusion-like conditions[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 44: 15–20.
- [73] ZHANG J C, LIU L, LIU H Z, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 59: 3267–3280.
- [74] SAGALOWICZ L, MICHEL M, BLANK I, et al. Self-assembly in food – A concept for structure formation inspired by Nature [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2017, 28: 87–95.

### Research Advances in the Cross-Scale Structure and Texture Properties of Starch/ Plant Protein Complexes during Extrusion Process

Li Lin<sup>1,2,3</sup>, Li Xiaoxi<sup>2</sup>, Chen Xu<sup>3</sup>, He Zhongchao<sup>2</sup>, Zhu Jie<sup>3</sup>, Yan Jingkun<sup>3</sup>, Yuan Jianjun<sup>1</sup>, Wang Baobei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Oceanology and Food Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, Fujian

<sup>2</sup>School of Food Science and Engineering, South China University of Technology; Engineering Research Center of Starch and Plant Protein Deep Processing of Ministry of Education; Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640

<sup>3</sup>School of Life Health and Technology, Dongguan University of Technology; Engineering Research Center of Health Food Design & Nutrition Regulation of DGUT; Dongguan Key Laboratory of Typical Food Precision Design; China National Light Industry Key Laboratory of Healthy Food Development and Nutrition Regulation, Dongguan 523808, Guangdong)

**Abstract** Plant-based nutritional and healthy foods have been the future directions in future food industry as well as an important demand of national healthy diet. To develop plant-based nutritional and healthy foods, it is necessary to understand the formation and evolution of the cross-scale structure of food soft matter during processing and the related influence on functions and properties. Based on elucidating the cross-scale structural characteristics of the nutritional and healthy food, the creation pathway and the regulation mechanism of texture characteristics of plant-based nutritional and healthy food products were further analyzed. According to the principle and application of extrusion processing technology,

the research advances of the effect on the starch/ plant protein complexes during extrusion processing were demonstrated, which included the formation and evolution rules of cross-scale structure of the complexes and their texture characteristics. The important basic scientific problems and the future outlooks in the exploration of related research areas were also pointed out, which were aimed to provide guideline for improving the quality of plant-based nutritional and healthy foods and promoting the food industry development in a comprehensive manner.

**Keywords** starch; plant-protein; extrusion; cross-scale structure; texture characteristics