

植物蛋白淀粉样纤维研究现状与应用

王鹏巍¹ 陈 军^{1,2} 王浩强¹ 帅希祥³ 戴涛涛^{1,2}

(1. 南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西 南昌 330047; 2. 江西南大国创院食品科技有限公司, 江西 南昌 330200; 3. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东 湛江 524091)

摘要:大多数天然植物蛋白具有致密的球状结构,降低了其功能性和蛋白酶的可及性,这在一定程度上限制了其在食品领域的应用。通过酸热诱导自组制备具有高长径比和优良界面性质的植物蛋白淀粉样纤维,可极大改善植物蛋白的理化性质、营养价值和功能特性。文章综述了植物蛋白淀粉样纤维的形成机制和酸热诱导自组制备的方法,总结了其结构与性质的联系,讨论了植物蛋白淀粉样纤维的应用方向,并展望了其后续研究发展方向。

关键词:植物蛋白;淀粉样纤维;结构表征;酸热诱导

Research status and application of plant protein amyloid fibrils

WANG Pengwei¹ CHEN Jun^{1,2} WANG Haoqiang¹ SHUAI Xixiang³ DAI Taotao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China; 2. International Institute of Food Innovation Co., Ltd., Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330200, China; 3. Institute of Subtropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China)

Abstract:Most natural plant proteins have dense spherical structures, reducing their functionality and accessibility to proteases, which limits their application in the food industry to some extent. The preparation of plant protein amyloid fibrils with high aspect ratio and excellent interfacial properties through acid-heat-induced self-assembly can significantly improve the physicochemical properties, nutritional value, and functional characteristics of plant proteins. This study reviews the formation mechanism and preparation methods of acid-heat-induced self-assembly of plant protein amyloid fibrils, summarizes the relationship between their structure and properties, discusses the application directions of plant protein amyloid fibrils, and looks forward to their future research directions.

Keywords: plant protein; amyloid fibril; structural characterization; acid-heat-induced

目前,随着人们对健康饮食的重视和蛋白质消费需求量的增长,世界癌症研究基金会(WCRF)和世界卫生组织(WHO)推荐在日常饮食中增加植物蛋白的比例^[1-2]。植物蛋白种类丰富、成本低廉、可以为人体提供充足且丰富的氨基酸,改善由于过度消费动物蛋白导致的膳食蛋白质不均衡和蛋白质营养不良的现状,在食品领域的研究价值和地位愈发凸显。与动物蛋白相比,植物蛋白原料大多存在抗营养因子,相对难以得到充分消化利用,且天然植物蛋白的结构具有明显折叠层次,多呈紧密球状结构,降低了蛋白酶的可及性,从而导致加工处理较难、

功能性较差、风味口感不佳等缺陷,因此,进一步推进植物蛋白的高值化应用阻碍重重^[3]。为了解决上述问题,越来越多的研究着眼于提升植物蛋白功能性质的新方法,包括但不限于多种蛋白质的复配、蛋白质官能团修饰、与其他生物大分子构建络合物等^[4-5],均显著改善了植物蛋白的结构和性质。

近年来,植物蛋白淀粉样纤维化处理因其蛋白来源丰富、制备工艺简单、应用范围较广等成为具有极大潜力的改性策略之一^[6-7]。最早有关蛋白淀粉样纤维聚集体的研究聚焦于神经学领域,认为错误折叠的蛋白质通过

基金项目:江西省“双千计划”创新领军人才长期(青年)项目(编号:jxsq2023101076)

通信作者:戴涛涛(1991—),男,南昌大学讲师,博士。E-mail: ncubamboo@163.com

收稿日期:2025-06-09 **改回日期:**2025-11-17

引用格式:王鹏巍,陈军,王浩强,等. 植物蛋白淀粉样纤维研究现状与应用[J]. 食品与机械,2026,42(4):210-219.

Citation:WANG Pengwei, CHEN Jun, WANG Haoqiang, et al. Research status and application of plant protein amyloid fibrils[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 210-219.

相互聚合形成病理性淀粉样蛋白原纤维聚集体是一些神经退行性疾病(如阿尔兹海默症)、2型糖尿病等疾病的诱因^[8]。近年来研究发现,通过物理、化学等手段打破维系植物蛋白空间结构的化学键进而体外制备的蛋白淀粉样纤维具有良好的理化性质,因此,可对其形成机制、空间结构、制备方式、应用等方面进行深入探究。植物蛋白淀粉样纤维(plant protein amyloid fibrils)是以天然植物蛋白,例如豆类蛋白、谷类蛋白、种子蛋白、油料作物类蛋白等为原料^[9-14](见图1),在酸热诱导下,经过展开、降解、聚集等过程,得到的一种微米到纳米尺度不等^[19]、富含 β -折叠结构的纤维状蛋白。植物蛋白淀粉样纤维是一种高度有序的蛋白质聚集体,同时具备高长径比、高表面疏水性、高稳定性、高杨氏模量、抗拉伸、低致敏性和低细胞毒性等性质^[20-24],极大程度拓宽了植物蛋白的应用范围。

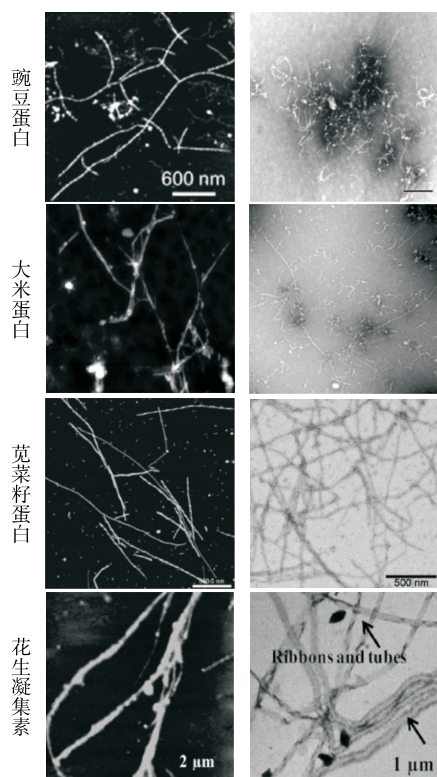


图1 植物蛋白淀粉样纤维来源以及形态观察结果^[9-10,15-18]

Figure 1 Sources and morphological observations of plant protein amyloid fibrils

淀粉样纤维化处理通过诱导植物蛋白分子定向组装为 β -折叠纳米纤维结构,显著改善了植物蛋白的功能特性,如溶解性、发泡性、乳化性、增稠性等^[25-28],有利于扩展植物蛋白在食品行业的广泛应用,为开发清洁标签、高附加值植物蛋白产品提供创新解决方案。文章拟对植物蛋白淀粉样纤维的制备方法、理化特性、应用领域等研究

进展进行综述,为植物蛋白淀粉样纤维在食品工业中的应用提供依据。

1 植物蛋白淀粉样纤维形成与制备

1.1 植物蛋白淀粉样纤维的形成

一般纤维结构的蛋白并不完全等同于蛋白淀粉样纤维。如图2所示,植物蛋白淀粉样纤维形成过程呈“S”生长动力学曲线,主要分为3个阶段:滞后期,可溶性单体逐渐聚集成不稳定的核,伴随 β -折叠结构的形成;进入生长期,核与寡聚体通过 β -折叠延伸快速组装成原纤维;最后原纤维进一步结合形成成熟的多链淀粉样纤维,结构趋于稳定,此时为淀粉样纤维形成的饱和期^[29-30]。从能量的角度来看,天然植物蛋白通过减小总界面能量来使其自由能最小化,此状态下蛋白疏水基团包埋在分子内部,亲水基团尽可能与水溶液接触^[31];而未折叠的蛋白质熵值和自由能较高,蛋白链总是按照熵值和自由能减小的趋势折叠,在分子间接触的情况下,蛋白质折叠过程中可能偏离正常途径,形成错误折叠构象,从而出现其他热力学上有利的构象,如折叠中间态、部分折叠态、无定形聚集体、淀粉样原纤维等^[32],其中淀粉样原纤维能量最低也最为稳定。在高温、强酸环境下,或在助溶剂的存在下^[33],均可以使折叠的蛋白打开内部结构,暴露出易聚集的区域,使蛋白形成热力学最有利的状态——淀粉样原纤维。

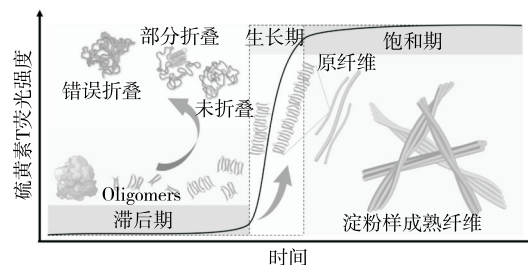


图2 植物蛋白淀粉样纤维形成过程的“S”生长动力学曲线^[29]

Figure 2 "S" growth kinetics curve of plant protein amyloid fibrils formation process

1.2 植物蛋白淀粉样纤维的酸热诱导制备

酸热诱导是一种常见的实验室制备植物蛋白淀粉样纤维的方法。植物蛋白淀粉样原纤维的制备通常需在高温(高于蛋白变性温度)、低pH(远离蛋白质等电点)、低盐离子强度及持续搅拌下进行数小时孵育。在此过程中,热效应与酸碱协同作用破坏了蛋白质分子内氢键,使球状蛋白逐渐去折叠,促使 α -螺旋结构解旋并重构为 β -折叠构象,生成大量具有自组装能力的多肽段。同时,低离子浓度环境通过维持多肽链间的静电斥力,抑制无序聚集行为,促使疏水相互作用主导的分子链定向排列^[34]。

这种动态平衡使得伸展的多肽链通过分子间氢键有序堆叠,最终自组装形成直径为 1~10 nm,长度为 1~10 μm 的纤维状结构。此外,物理和化学等方式可以辅助植物蛋白淀粉样纤维的制备,例如在 pH 2.0、80 $^{\circ}\text{C}$ 下辅助超声 6 h 可以制备紧密缠结的大豆蛋白淀粉样纤维^[35]。

Cao 等^[36]综述了自组制备淀粉样纤维的通用条件: 80~90 $^{\circ}\text{C}$ 、pH 2.0、无盐离子,300 r/min 搅拌 5~24 h。Kutzli 等^[11]研究了质量分数 2%,pH 2.0,温度 90 $^{\circ}\text{C}$,300 r/min 搅拌 5 h,可制备大麻籽蛋白淀粉样纤维。黄慧等^[37]将米谷蛋白溶液 pH 调至 2.0,85 $^{\circ}\text{C}$ 加热 2~15 h,制得米谷蛋白淀粉样纤维,其中加热 15 h 的样品表面疏水性最低,推测纤维数量也最多。植物蛋白淀粉样纤维制备示意图如图 3 所示。此外,蛋白的空间位阻会影响淀粉样纤维的形成,如短肽链自组装速度快于长肽链^[38]。

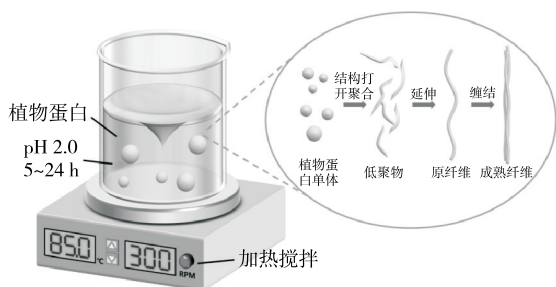


图 3 植物蛋白淀粉样纤维的制备

Figure 3 Preparation of plant protein amyloid fibrils

1.3 酸热诱导法制备植物蛋白淀粉样纤维的影响因素

1.3.1 体系 pH 当体系 pH 低于蛋白等电点时,蛋白质表面正电荷密度显著增加,当表面正电荷增加到无法被屏蔽的程度后会诱导蛋白质分子发生有序空间聚集,为纤维化提供结构基础。强酸性条件(pH 2.0)下,蛋白质首先经历酸水解作用,肽链的断裂破坏其天然稳定构象,形成有利于纤维化组装的功能性肽段;同时,强烈的静电斥力促使蛋白结构展开形成未折叠态或熔球态,这种部分去折叠的中间态是淀粉样纤维形成的初始阶段。纤维化最终产物的形态会随着 pH 从弱酸性向强酸性的过度而呈现显著变化:在饱和期,原纤维长度从亚微米级延伸至微米级,结构刚性逐渐增强,最终缠结组装形成半柔性纤维^[39]。Wan 等^[40]研究表明,弱酸性条件(pH 6.0)下,蛋白主要形成层间距较大的多片层结构;当 pH 降至强酸范围(pH 2.0)时,片层结构进一步堆叠,最终组装为原纤维。

1.3.2 温度 在原纤维的形成过程中会涉及蛋白内部旧键断裂和新键(分子间氢键、疏水相互作用等)形成,适当的温度会加速这一进程^[41],但对原纤维产率无太大影响,然而,温度会影响原纤维的形成速率和形态。Loveday 等^[42]研究发现,当温度为 100~120 $^{\circ}\text{C}$ 时,原纤维形成最大

速率随着温度的升高而增加;当温度 >120 $^{\circ}\text{C}$ 时,较大纤维会破裂形成短纤维,因此,一般认为原纤维制备的理想温度为 80~90 $^{\circ}\text{C}$ 。Chen 等^[43]研究发现,蛋白质原纤维的轮廓长度在 100,121 $^{\circ}\text{C}$ 下随着加热时间的延长逐渐减小,即 100,121 $^{\circ}\text{C}$ 下加热会导致蛋白原纤维的降解和解聚,但淀粉样纤维可以在相对温和的条件下降解,具有一定的环境友好性。

1.3.3 离子 离子通过与蛋白特异性结合改变蛋白质的带电状态,扰乱蛋白原有的静电相互作用,从而影响淀粉样纤维的形成过程和最终形态。Song 等^[9]研究发现,低盐浓度下有利于蛋白形成有序聚集体,升高盐离子浓度,蛋白随机聚集会形成无定形聚集体。低离子强度下,蛋白静电排斥作用相对较强,使得肽段可以有序排列依附于已形成的原纤维上,较高的离子强度则会扰乱静电斥力,使肽段分布更加随意和混乱^[44]。Adamcik 等^[45]研究发现,离子强度增强时,原纤维的间距也会增加,最终原纤维趋于解聚状态。此外,不同金属离子对植物蛋白淀粉样纤维的影响也不同, Mg^{2+} 和 Zn^{2+} 会诱导蛋白构象展开,增加植物蛋白的疏水性,使淀粉样纤维排列更加紧密,而 Na^{+} 和 Cl^{-} 则会加速二级结构的转变,增加 β -折叠含量^[46-47]。

1.3.4 蛋白浓度 当蛋白浓度升高时,可用于形成原纤维的有效肽段越多,并促进沿骨架堆叠的 β -折叠伸长,有利于纤维的组装和延展,但形成植物蛋白淀粉样纤维的最佳浓度一般 $<10\%$ 。一般来说,低浓度($<4\%$)的蛋白倾向于形成半柔或卷曲纤维,高浓度的蛋白($\geq 8\%$)则开始形成纵向延伸的刚性原纤维,处于中间浓度的蛋白,其淀粉样纤维形态一般为短蠕虫状^[48]。Zheng 等^[49]采用不同浓度的大豆蛋白在 pH 2.0、90 $^{\circ}\text{C}$ 下制备淀粉样纤维,当大豆蛋白浓度为 2% 时,大豆蛋白淀粉样纤维转化率接近 60%;当蛋白浓度从 2% 增加到 8% 时,大豆蛋白淀粉样纤维的相对转化率显著增加了 29%;当蛋白浓度 $>8\%$ 时,大豆蛋白淀粉样纤维转化率开始降低。表明增加蛋白浓度可以促进淀粉样纤维的转化,但这种促进作用存在一个临界值。当蛋白浓度超过临界值时,淀粉样纤维便有可能朝无定形聚集态的方向转变。

1.3.5 机械搅拌和物理场 蛋白在剪切和搅拌作用下往往会进一步发生空间结构的改变,表现出去折叠的现象,蛋白结构的打开可为淀粉样纤维的形成提供原料。Hill 等^[50]研究发现,剪切会诱导球蛋白的聚集,并使蛋白获得足以打开肽链的能量,使蛋白质发生去折叠行为,促使原纤维的形成。Wang 等^[51]通过硫黄素 T(ThT)荧光表征了原纤维的形成过程,发现搅拌处理加快了淀粉样纤维的形成速度,同时与静态条件下形成的原纤维相比,搅拌形成的原纤维具有更高的黏度和储存模量。但过度搅拌会使长纤维发生机械断裂,生成更短的刚性纤维^[52]。

超声波可以在液体环境中转化为高频振荡,进而展开球蛋白的折叠结构,使其暴露出内部疏水基团,从而改变蛋白质的天然构象,因此,通过超声处理的蛋白更容易形成淀粉样纤维。李燕涛等^[53]在大豆分离蛋白淀粉样纤维孵育前加入 15 min 的 200 W、40 Hz 的超声预处理,之后在 75 ℃、pH 2.0 下孵育 6 h,观察到了最大的荧光强度,表明超声处理可以促进蛋白淀粉样纤维的形成,缩短淀粉样纤维的制备时间,提高蛋白淀粉样纤维含量。

2 植物蛋白淀粉样纤维的结构特征与性质

2.1 植物蛋白淀粉样纤维的结构特征

Gremer 等^[54]研究表明,许多单个淀粉样植物蛋白层交错排列会形成原丝,多个原丝横向结合或相互缠绕会形成一个植物蛋白淀粉样纤维。不论何种植物蛋白质形成的淀粉样纤维,均含有交叉 β 结构,赋予了淀粉样纤维优良的稳定性,同时也是区分淀粉样纤维与其他蛋白体的根本结构特征,这种结构是指 β -折叠(β -sheet)方向平行于主纤维轴,而 β -股(β -strand)方向垂直于主纤维轴^[55]。交叉 β 结构由于受到附加力的影响,稳定性远远优于单个的 β -折叠层,此外交叉 β 结构之间侧链相互交联,形成了紧密排列的平面,从纤维轴向下看交叉的侧链排列形成了“空间立体拉链”结构^[56],其片层间隔约为 1 nm,肽链间隔约为 0.48 nm^[57],使淀粉样纤维稳定性进一步增加。植物蛋白淀粉样纤维结构示意图如图 3 所示。值得注意的是,能够形成这种结构是蛋白质的一般属性^[36],即无论何种来源的蛋白质均有自组装形成淀粉样纤维的倾向。

不同组分的植物蛋白自组装成淀粉样纤维的结构、形成能力和速度有所差异。以大豆蛋白为例,大豆分离蛋白形成的纤维含有规则的二级结构,且聚集体具有热降解的趋势;在酸热诱导过程中 7S 组分的二级结构更容易发生变化,形成的纤维具有更加卷曲的结构;11S 组分的酸性、碱性亚基因为分子相互作用可以快速聚集,自组装纤维的速度最快,且所需的 pH 范围更为宽泛^[58-59]。这是因为蛋白质的二级结构起主导作用,在自组装过程中一般表现为 α -螺旋含量下降, β -折叠含量升高^[60],即二级结构发生变化的难易程度决定了所形成的淀粉样纤维的结构、速度等,此外氨基酸的组成和肽段序列一定程度上也会影响纤维形态。对于大米蛋白而言,Wang 等^[61]研究发现,改性后的大米蛋白和球蛋白原纤维表现出缠结聚集行为,而谷蛋白原纤维明显伸长,长度为几微米,可能是因为不同性质氨基酸的含量差异和修饰引起的芳香氨基酸相互作用的变化导致同一蛋白质的自组装行为不同。

此外,淀粉样纤维的结构具有多样性,即蛋白链折叠状态的多样性。淀粉样纤维中肽构象或堆积方式、构成

淀粉样纤维的原丝数量和排列方式存在差异等导致了结构多样性。此外,蛋白质可以自组装形成具有不同数量原丝的扭曲带、纳米管、晶体等结构形态^[29, 62-63],从一定程度上证实了结构的多样性。

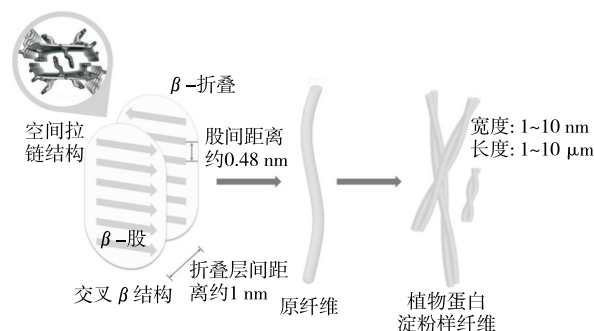


图 4 植物蛋白淀粉样纤维结构示意图^[36]

Figure 4 Structure of plant protein amyloid fibrils

植物蛋白淀粉样纤维的表征方法主要包括 X 射线衍射、ThT 荧光技术和刚果红(CR)染色法。X 射线衍射图可以观察到淀粉样纤维中排列的交叉 β -折叠结构,而未排列的原纤维则形成环状^[56]。ThT 能够在溶液中形成胶束,之后通过静电相互作用和疏水相互作用在原纤维或原纤维中扭曲的凹槽中实现高度特异性结合,从而使荧光强度提升^[64]。偶氮染料刚果红是使用最广泛的淀粉样纤维特异性染料之一^[65],刚果红中的两个硫酸盐基团可以分别与淀粉样纤维中的质子化氨基和胍基产生静电相互作用,同时氨基部分可以与淀粉样纤维侧链交叠形成氢键^[66]。纤维化动力学只能通过 ThT 荧光来测量,而 CR 的特征吸收光谱和双折射对于淀粉样纤维的表征和鉴别更有说服力,结合两种测试方法的优点采用两种染料联合表征淀粉样纤维可能具有更高的灵敏度、更高的可靠性,表征的信息内容更有价值^[67]。此外,傅里叶变换红外光谱可用于区分天然蛋白质与蛋白淀粉样纤维的交叉 β -折叠结构^[68];通过原子力显微镜、扫描电镜等技术可以观测到植物蛋白淀粉样纤维的微观结构。魔角自旋固体核磁共振^[69]、中子散射法^[70]等方法同样可用于蛋白淀粉样纤维的检测、鉴定和表征。

2.2 植物蛋白淀粉样纤维的性质

2.2.1 物理性质 植物蛋白淀粉样纤维最显著的特征是高长径比。此外,植物蛋白淀粉样纤维交叉的 β -折叠区域中存在致密且有序的氢键网络^[71],因此,具有高杨氏模量(2~4 GPa)和高拉伸强度。Solar 等^[72]对 6 种淀粉样蛋白或淀粉样蛋白原纤维进行了一系列全原子分子动力学模拟,发现蛋白质纤维的极限拉伸强度直接与在初始断裂中每单位面积氢键的数目成正比。同时,植物蛋白淀粉样纤维结构间广泛的氢键极大地增加了其稳定性和热

抗性。此外,植物蛋白淀粉样纤维具有较好的可降解性。Makshakova 等^[73]研究发现,经线性阴离子多糖(如卡拉胶和藻酸钠)处理后,蛋白的淀粉样纤维结构发生解体,使蛋白质复性。

2.2.2 界面性质 淀粉样纤维轮廓长度在微米数量级,但宽度仅有几纳米,这种特征使其在较低浓度下就能形成空间填充网络,与天然蛋白相比可以显著增加体系黏度^[74],同时柔性的空间结构赋予淀粉样纤维良好的溶解度,使淀粉样纤维可以快速分散至两相界面,因此可以用于乳化剂、起泡剂、增稠剂、凝胶剂等。Li 等^[16]研究发现,纤维化处理后的大米谷蛋白拥有更好的乳化活性和乳化稳定性,这可能归因于淀粉样纤维具有柔性结构和更好的溶解度。Qi 等^[21]研究发现,乳化稳定性与纤维长度呈负相关,较长的原纤维表现出较低的乳化稳定性,可能是因为长原纤维导致乳液液滴难以覆盖。基于流变学的角度,黏弹性、黏度、储能/损耗模量、机械强度等高度依赖于蛋白淀粉样纤维类型、长度、柔韧性、络合缠绕的结构排列。持续的剪切会使蛋白淀粉样纤维的聚集体逐渐解离重排,表现出剪切稀化的特征^[75]。

2.2.3 生理活性 植物蛋白淀粉样纤维在形成过程中会逐渐暴露内部疏水基团,易与疏水性活性物质相结合,增强其与功能性物质的相互作用。在高温和低酸处理下发生一系列降解、展开、聚集、水解等物理化学变化,均会破坏蛋白的天然结构,降低其致敏性^[76]。Lassé 等^[24]以芸豆和大豆蛋白为主要原料制备淀粉样纤维,发现原纤维对蛋白酶 K、胃蛋白酶和胰酶的体外水解表现出不同的抗性。Hu 等^[77]研究发现,蛋白淀粉样纤维在一定程度上能够破坏细菌的细胞膜,导致细菌裂解,因而蛋白淀粉样纤维具有较强的抗菌活性。

蛋白淀粉样纤维在消化性与无细胞毒性方面表现出良好特性,具备作为安全食品成分的潜力。Xu 等^[78]研究表明,通过体外模拟胃肠道消化,蛋白淀粉样纤维在胃部阶段即被胃蛋白酶迅速水解为多肽,进入肠道后进一步被胰酶降解为相对分子质量 $<5\ 000$ 的寡肽,与天然蛋白单体的消化产物在分子组成上高度相似。此外,原子力显微镜与微流控偏振光成像结果显示,在标准酶浓度下,淀粉样纤维可被完全消化,不存在未被降解的纤维片段。陈慧等^[79]研究显示,蚕豆 11S 蛋白淀粉样纤维在与细胞共同孵育 24 h 后,细胞活性仍维持在 100% 左右,体现出优异的生物相容性。综合现有证据,从消化性角度来看,蛋白淀粉样纤维不仅能够被人体胃肠道系统有效降解为寡肽和氨基酸,其消化程度至少不低于天然蛋白单体,同时在消化过程中不产生毒副作用,对健康与环境无显著不良影响,因而在食品工业中具有广阔的应用前景。

3 植物蛋白淀粉样纤维在食品领域中的应用

植物蛋白淀粉样纤维的结构和理化性质决定了其应用方向。常见的应用方向(见图 5)主要有表面活性物质、生物活性物质递送系统、包装材料和支架、增稠剂和稳定剂等。

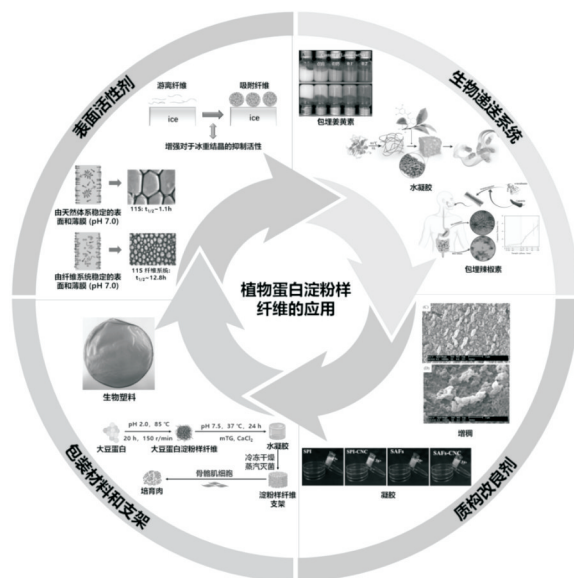


图 5 植物蛋白淀粉样纤维的应用方向^[37, 77, 80-86]

Figure 5 Application direction of plant protein amyloid fibrils

3.1 表面活性剂

与天然植物蛋白相比,蛋白淀粉样纤维具有优异的表面活性和形成持久黏附网络的能力,可作为乳化剂制备水包油乳液。白露等^[87]研究发现,与天然绿豆球蛋白相比,绿豆球蛋白淀粉样纤维拥有较好的乳化性,乳化活性指数(EAI)、乳化稳定性指数(ESI)分别提升了 168.80% 和 103.0%。Pang 等^[88]制备了以米糠蛋白原纤维稳定的水包油乳液,当米糠蛋白原纤维加热 7 h 后,原纤维的平均轮廓长度和疏水性最高,表现出良好的乳化性能。Fu 等^[80]研究发现,淀粉样蛋白原纤维具有冰重结晶抑制活性,当淀粉样纤维用作皮克林乳液稳定剂时,冰重结晶抑制活性显著增强,从而揭示淀粉样纤维作为乳化剂的应用,以改善含有乳液冷冻食品的品质。

泡沫是许多食品的重要组成部分,可以赋予产品特殊的外观和令人愉悦的口感。蛋白本身具有较好的起泡性,通过纤维化后蛋白的起泡性通常会优于天然蛋白质。蛋白淀粉样纤维可以在短时间内降低界面张力,在气泡周围形成更高弹性的网络结构^[89]。与天然蛋白相比,植物蛋白淀粉样纤维可以在低浓度下改善起泡性能,还可

以一定程度上增强泡沫稳定性。然而,大豆分离蛋白淀粉样纤维的起泡性能低于非纤维化蛋白,可能是因为大豆蛋白淀粉样纤维尺寸较大,降低了其吸附速率^[90]。

3.2 质构改良剂

植物蛋白淀粉样纤维可以作为改善食品质构特性的添加剂使用。蛋白质分子链打开后,其分子侧链基团暴露,分子间结缔能力显著提高,进而能够在较低浓度下增加体系黏度或增强凝胶强度,可应用于食品胶凝剂和增稠剂。Zhang等^[85]研究表明,在米糠蛋白溶液中添加米糠蛋白淀粉样纤维不仅不会干扰溶液自身稳定性,还能使溶液黏度增加约1个数量级,并可以在较低浓度下形成凝胶,米糠蛋白淀粉样纤维成熟度越高,其凝胶强度也越高。Munialo等^[15]将豌豆蛋白淀粉样纤维通过缓慢酸化将pH从7.0降至5.0左右诱导形成稳定凝胶,随着豌豆蛋白浓度的提升,凝胶强度也显著增加。此外,在不显著改变冷冻肉糜的外观颜色的前提下,添加蛋白淀粉样纤维可以显著改善肉糜的持水性和抗氧化性,并改善热凝胶稳定性,表明蛋白淀粉样纤维具有作为冷冻肉糜质构稳定剂的潜力^[91]。植物蛋白淀粉样纤维可以作为新型食品增稠剂,在新型低脂、低热量功能性食品中具有较大应用前景。

3.3 生物活性物质递送系统

植物蛋白淀粉样纤维也是一种有应用前景的药物和生物活性化合物递送载体。蛋白质经过纤维化处理后,不仅满足了食品级要求,还对人体细胞无毒害,且其界面性质、热稳定性、耐酸碱性和对酶解的抗性均显著提升,将其作为包埋剂或微胶囊壁材可有效保护生物活性成分在加工、运输、给药过程中不被破坏,极大地保留了药物的有效成分。其中采用基于大豆分离蛋白的淀粉样纤维制备的微胶囊已用来包埋生物活性化合物,如鱼油^[92]和姜黄素^[81]。Tong等^[93]研究发现,超声波辅助EGCG处理的大豆蛋白原纤维具有较高的稳定性、黏度和抗氧化活性,同时提高了其体外生物利用性。周向军等^[94]采用胰蛋白酶法和酸热处理制备的马铃薯蛋白纤维,发现该法制备的蛋白纤维具有有序的二级结构,在包埋姜黄素时其包封率最高可达96.16%,装载量最高可达19.62 μg/mg,相较于最低浓度包封率提升48.72%,装载量提升5.04倍,并显著提高了姜黄素的热稳定性及抗氧化活性。

水凝胶是指大分子通过交联作用,在空间形成包含水分的三维立体网状多层次结构,是保护和控制释放生物活性物质等微量营养素的理想基质^[95]。蛋白淀粉样纤维与小分子多酚之间的非静电物理相互作用可以实现可逆水凝胶的制备^[96]。此类可逆水凝胶具备剪切稀释性、可逆性以及耐热性等特性,同时能够导致细胞膜破裂,从而展示出有效抗菌活性^[97],同时可以通过将功能活性物质定向递送到目标位点,实现靶向给药。例如治疗与微

生物感染有关的肠道疾病时,通过利用蛋白淀粉样纤维联合EGCG制成的水凝胶来保护多酚经过胃部消化运输到肠道,解决小肠部位不易给药、不易缓释药物的问题^[77]。植物蛋白淀粉样纤维具有可食用性和生物安全性,因此在未来食药工业中用于递送系统具有广阔的发展前景。

3.4 包装材料和支架

随着经济水平的不断提升及科技发展的进步,人们对减少环境污染的关注度日益提高,正在积极寻求可替代塑料的环境友好型材料。植物蛋白淀粉样纤维细长柔韧的结构具有较高的杨氏模量,使其可以被制备成薄膜和生物塑料,从而可作为新型包装材料,并且由于其来源广泛、价格低廉、容易降解等特点,植物蛋白淀粉样纤维在减轻塑料污染的环境负担方面具有极大潜力。Bagnani等^[83]研究发现,将由油菜籽蛋白制备的淀粉样纤维与聚乙烯醇和甘油混合,形成生物塑料膜,其特征是吸水率降低,拉伸至断裂时,其伸长长度约为原长度的6倍,与天然蛋白制备的膜相比增加了1倍多。

此外,由于植物蛋白淀粉样纤维具有高长径比,纤维更容易定向组装成网络结构,因此可以用于开发可持续且可食用的支架生产培育仿生肉类食品。Wei等^[84]以大豆蛋白淀粉样蛋白原纤维为原料,使用生物和物理交联方法(微生物转谷氨酰胺酶和水蒸气退火技术)制备了交联大豆蛋白淀粉样蛋白原纤维,从而制备了稳定性高且易降解的3D支架。大豆蛋白淀粉样原纤维支架能够使小鼠骨骼肌成肌细胞增殖和分化,而无需添加细胞黏附蛋白,使丰富且廉价的大豆蛋白淀粉样蛋白原纤维有潜力用作食品工业中培育肉类的支架材料,可极大满足植物蛋白高值化加工需求的同时实现食品工业可持续、符合伦理的研发宗旨。

4 结语

为了满足消费者的健康、营养等需求,同时考虑到生产成本,植物蛋白在蛋白质市场上占据越来越大的比例。通过将天然植物蛋白的球状结构打开,进而降解、相互聚集、缠结形成丝状纤维,可改善植物蛋白的加工特性和理化性质,赋予其良好的消化性和生物可及性,极大程度上提高了植物蛋白的利用价值。植物蛋白淀粉样纤维是具有多领域应用潜力的新型生物材料,其通过包埋活性成分实现缓释功能,为靶向治疗和营养强化提供支持;与小分子疏水物质结合可制备多功能水凝胶,拓展其生物医药应用。其凭借高机械强度与长径比特性,成为绿色包装及涂膜材料的理想选择。此外,植物蛋白淀粉样纤维能作为肉类培育支架,推动人造肉与脂肪替代品创新,满足宗教人士及慢性病患者等群体的特殊饮食需求。

目前,植物蛋白淀粉样纤维尚未大规模进入市场,虽

然其安全性已被证实,但仍需对更多不同植物来源的蛋白淀粉样纤维进行动物试验和临床安全性检验,同时需要对其在食品中的添加方式、添加量进行规范化。此外,淀粉样纤维的工业化生产存在困难,从实验室走向工厂尚且任重道远。植物蛋白淀粉样纤维在复杂食品体系中的相互作用有待探究。植物蛋白淀粉样纤维具有优良的结构与性质,使其在各领域中均表现出巨大潜力,因此,需加快植物蛋白淀粉样纤维的产业化进程,最终实现植物蛋白的高值化利用。

参考文献

- [1] LEHIKONEN E, SALONEN A O. Food preferences in Finland: sustainable diets and their differences between groups [J]. Sustainability, 2019, 11(5): 1 259.
- [2] SEMBA R D. The rise and fall of protein malnutrition in global health[J]. Annals of Nutrition & Metabolism, 2016, 69(2): 79-88.
- [3] LANGYAN S, YADAVA P, KHAN F N, et al. Sustaining protein nutrition through plant-based foods[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 8: 772573.
- [4] AJOMIWE N, BOLAND M, PHONGTHAI S, et al. Protein nutrition: understanding structure, digestibility, and bioavailability for optimal health[J]. Foods, 2024, 13(11): 1 771.
- [5] 欧文华, 曹天翔, 张冬梅, 等. 米糠蛋白乳化性能及其改性方法研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 204-211, 240.
- OU W H, CAO T X, ZHANG D M, et al. Research progress on emulsifying properties and modification methods of rice bran protein[J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 204-211, 240.
- [6] LI T, ZHOU J T, PEYDAYESH M, et al. Plant protein amyloid fibrils for multifunctional sustainable materials[J]. Advanced Sustainable Systems, 2023, 7(4): 2200414.
- [7] LIANG Y, ZHANG P H, LIU M, et al. Plant-based protein amyloid fibrils: origins, formation, extraction, applications, and safety[J]. Food Chemistry, 2025, 469: 142559.
- [8] XING Y M, HIGUCHI K. Amyloid fibril proteins[J]. Mechanisms of Ageing and Development, 2002, 123(12): 1 625-1 636.
- [9] SONG Y J, LI T, ZHANG X X, et al. Investigating the effects of ion strength on amyloid fibril formation of rice proteins[J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102068.
- [10] XU Z J, WANG X S, GAO Y, et al. Structural insights into acidic heating-induced amyloid fibrils derived from soy protein as a function of protein concentration[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109085.
- [11] KUTZLI I, ZHOU J T, LI T, et al. Formation and characterization of plant-based amyloid fibrils from hemp seed protein[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108307.
- [12] YANG Q, WANG Y R, DU Y N, et al. Comparison of the assembly behavior and structural characteristics of arachin and conarachin amyloid-like fibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108479.
- [13] 彭圆, 翟月滢, 刘采怡, 等. 米谷蛋白淀粉样纤维聚集体自组装过程中蛋白质结构演变、功能性质及体外消化性研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 30-38.
- PENG Y, ZHAI Y Y, LIU C Y, et al. Studies on the structural evolution, functional and *in vitro* digestive properties of rice glutelin during the self-assembly of the amyloid fibril aggregates[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(3): 30-38.
- [14] 王金梅, 王梦萍, 韦翠兰, 等. 大豆球蛋白的纤维聚集体行为及其稳定性研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(11): 42-48, 118.
- WANG J M, WANG M P, WEI C L, et al. Fibrillar aggregation behavior and stability of soy globulin[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(11): 42-48, 118.
- [15] MUNIALO C D, MARTIN A H, VAN DER LINDEN E, et al. Fibril formation from pea protein and subsequent gel formation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(11): 2 418-2 427.
- [16] LI T, ZHOU J T, WU Q L, et al. Modifying functional properties of food amyloid-based nanostructures from rice glutelin[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133798.
- [17] MYKOLENKO S, SOON W L, MEZZENGA R. Production and characterization of amaranth amyloid fibrils from food protein waste[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109604.
- [18] TABBASUM K, RAO C P. Zn²⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ mediated formation of amyloid like fibrils by the monomers of β -sheet rich peanut agglutinin[J]. RSC Advances, 2014, 4(95): 53 044-53 054.
- [19] CHEN D, NARAYANAN N, FEDERICI E, et al. Electrospinning induced orientation of protein fibrils[J]. Biomacromolecules, 2020, 21(7): 2 772-2 785.
- [20] GAO Y, XU Z J, JIN M Z, et al. Ability of soy protein derived amyloid fibrils to stabilize aqueous two-phase system and effect of pH on the system[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109084.
- [21] QI X, LI Y L, LI J W, et al. Fibrillation modification to improve the viscosity, emulsifying, and foaming properties of rice protein[J]. Food Research International, 2023, 166: 112609.
- [22] AKKERMANS C, VAN DER GOOT A J, VENEMA P, et al. Micrometer-sized fibrillar protein aggregates from soy glycinin and soy protein isolate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(24): 9 877-9 882.
- [23] LI S, JIANG Z Y, WANG F X, et al. Characterization of rice glutelin fibrils and their effect on *in vitro* rice starch digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105918.
- [24] LASSÉ M, ULLUWISHEWA D, HEALY J, et al. Evaluation of protease resistance and toxicity of amyloid-like food fibrils from whey, soy, kidney bean, and egg white[J]. Food

- Chemistry, 2016, 192: 491-498.
- [25] ALAVI F, EMAM-DJOMEH Z, MOHAMMADIAN M, et al. Physico-chemical and foaming properties of nanofibrillated egg white protein and its functionality in meringue batter[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105554.
- [26] FU Y Y, LI Y, SU H H, et al. Inhibiting ice recrystallization by amyloid protein fibrils[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 227: 1 132-1 140.
- [27] ZHANG Y H, HUANG L H, WEI Z C. Effects of additional fibrils on structural and rheological properties of rice bran albumin solution and gel[J]. European Food Research and Technology, 2014, 239(6): 971-978.
- [28] WU H Q, NIAN Y Q, LIU Y H, et al. Formation of pea protein amyloid fibrils to stabilize high internal phase emulsions for encapsulation of lutein[J]. Journal of Functional Foods, 2022, 94: 105110.
- [29] ADAMCIK J, MEZZENGA R. Amyloid polymorphism in the protein folding and aggregation energy landscape[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(28): 8 370-8 382.
- [30] MENG Y, WEI Z H, XUE C H. Protein fibrils from different food sources: a review of fibrillation conditions, properties, applications and research trends[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 121: 59-75.
- [31] MEZZENGA R, FISCHER P. The self-assembly, aggregation and phase transitions of food protein systems in one, two and three dimensions[J]. Reports on Progress in Physics Physical Society, 2013, 76(4): 046601.
- [32] BALCHIN D, HAYER-HARTL M, HARTL F U. *In vivo* aspects of protein folding and quality control[J]. Science, 2016, 353(6 294): aac4354.
- [33] STEFANI M. Protein folding and misfolding on surfaces[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2008, 9(12): 2 515-2 542.
- [34] FARJAMI T, MADADLOU A, LABBAFI M. Modulating the textural characteristics of whey protein nanofibril gels with different concentrations of calcium chloride[J]. The Journal of Dairy Research, 2016, 83(1): 109-114.
- [35] XIA W J, ZHANG H, CHEN J Y, et al. Formation of amyloid fibrils from soy protein hydrolysate: Effects of selective proteolysis on β -conglycinin[J]. Food Research International, 2017, 100: 268-276.
- [36] CAO Y P, MEZZENGA R. Food protein amyloid fibrils: origin, structure, formation, characterization, applications and health implications[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 269: 334-356.
- [37] 黄慧, 王传洋, 李世超, 等. 贮藏过程中米谷蛋白纤维聚集物理性质变化规律[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 134-140.
- HUANG H, WANG C Y, LI S C, et al. Changes of physicochemical properties of rice glutelin fibril aggregates during storage[J]. Food & Machinery, 2022, 38(6): 134-140.
- [38] DAVE A C, LOVEDAY S M, ANEMA S G, et al. Glycation as a tool to probe the mechanism of β -lactoglobulin nanofibril self-assembly[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(14): 3 269-3 278.
- [39] SERFERT Y, LAMPRECHT C, TAN C P, et al. Characterisation and use of β -lactoglobulin fibrils for microencapsulation of lipophilic ingredients and oxidative stability thereof[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 143: 53-61.
- [40] WAN Y L, GUO S T. The formation and disaggregation of soy protein isolate fibril: effects of pH[J]. Food Biophysics, 2019, 14(2): 164-172.
- [41] LOVEDAY S M, ANEMA S G, SINGH H. β -lactoglobulin nanofibrils: the long and the short of it[J]. International Dairy Journal, 2017, 67: 35-45.
- [42] LOVEDAY S M, WANG X L, RAO M A, et al. β -lactoglobulin nanofibrils: effect of temperature on fibril formation kinetics, fibril morphology and the rheological properties of fibril dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(1): 242-249.
- [43] CHEN D, PINHO L S, FEDERICI E, et al. Heat accelerates degradation of β -lactoglobulin fibrils at neutral pH[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107291.
- [44] LOVEDAY S M, WANG X L, RAO M A, et al. Tuning the properties of β -lactoglobulin nanofibrils with pH, NaCl and CaCl_2 [J]. International Dairy Journal, 2010, 20(9): 571-579.
- [45] ADAMCIK J, MEZZENGA R. Adjustable twisting periodic pitch of amyloid fibrils[J]. Soft Matter, 2011, 7(11): 5 437-5 443.
- [46] HANE F, LEONENKO Z. Effect of metals on kinetic pathways of amyloid- β aggregation[J]. Biomolecules, 2014, 4 (1): 101-116.
- [47] JI F Y, XU J J, OUYANG Y Y, et al. Effects of NaCl concentration and temperature on fibrillation, structure, and functional properties of soy protein isolate fibril dispersions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111862.
- [48] VANDENAKKER C C, ENGEL M F M, VELIKOV K P, et al. Morphology and persistence length of amyloid fibrils are correlated to peptide molecular structure[J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(45): 18 030-18 033.
- [49] ZHENG Y X, GAO Y X, CHANG Y Y, et al. Concentration-regulated fibrillation of soy protein: structure and *in vitro* digestion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(29): 11 170-11 179.
- [50] HILL E K, KREBS B, GOODALL D G, et al. Shear flow induces amyloid fibril formation[J]. Biomacromolecules, 2006, 7(1): 10-13.
- [51] WANG Y R, YANG Q, DU Y N, et al. Evaluation of the impact of stirring on the formation, structural changes and rheological properties of ovalbumin fibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 128: 107615.

- [52] HUMBLET-HUA N P, SAGIS L M C, VAN DER LINDEN E. Effects of flow on hen egg white lysozyme (HEWL) fibril formation: length distribution, flexibility, and kinetics[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(24): 11 875-11 882.
- [53] 李燕涛, 汪百雨, 王红, 等. 超声辅助制备大豆蛋白淀粉纤维及其结构表征的研究[J]. *中国油脂*, 2026, 51(3): 29-37, 45.
- LI Y T, WANG B Y, WANG H, et al. Preparation and structural characterization of soybean protein isolate amyloid fibrils by ultrasound-assisted low-hydrochloric acid thermal method[J]. *China Oils and Fats*, 2026, 51(3): 29-37, 45.
- [54] GREMER L, SCHÖLZEL D, SCHENK C, et al. Fibril structure of amyloid- β (1-42) by cryo-electron microscopy[J]. *Science*, 2017, 358(6 359): 116-119.
- [55] KE P C, ZHOU R H, SERPELL L C, et al. Half a century of amyloids: past, present and future[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, 49(15): 5 473-5 509.
- [56] EISENBERG D S, SAWAYA M R. Structural studies of amyloid proteins at the molecular level[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 2017, 86: 69-95.
- [57] CHATANI E, YUZU K, OHASHI Y, et al. Current understanding of the structure, stability and dynamic properties of amyloid fibrils[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(9): 4 349.
- [58] WANG Y J, SHEN Y T, QI G Y, et al. Formation and physicochemical properties of amyloid fibrils from soy protein [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 609-616.
- [59] DONG S R, XU H H, LI B Y, et al. Inhibition or improvement for acidic subunits fibril aggregation formation from β -conglycinin, glycinin and basic subunits[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 263-269.
- [60] LI X Y, LI G Y, ZENG Q Z, et al. The formation of soy protein fibrils-chitin nanowhisker complex coacervates: relationship to mixed foam stability[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 652: 129783.
- [61] WANG D, LI T, ZHANG X X, et al. Modification of rice protein and its components: enhanced fibrils formation and improved foaming properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 158: 110575.
- [62] ADAMCIK J, RUGGERI F S, BERRYMAN J T, et al. Evolution of conformation, nanomechanics, and infrared nanospectroscopy of single amyloid fibrils converting into microcrystals[J]. *Advanced Science*, 2021, 8(2): 2002182.
- [63] LARA C, ADAMCIK J, JORDENS S, et al. General self-assembly mechanism converting hydrolyzed globular proteins into giant multistranded amyloid ribbons[J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(5): 1 868-1 875.
- [64] PEARCE F G, MACKINTOSH S H, GERRARD J A. Formation of amyloid-like fibrils by ovalbumin and related proteins under conditions relevant to food processing[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(2): 318-322.
- [65] MONGE-MORERA M, LAMBRECHT M A, DELEU L J, et al. Processing induced changes in food proteins: amyloid formation during boiling of hen egg white[J]. *Biomacromolecules*, 2020, 21(6): 2 218-2 228.
- [66] ESPARGARÓ A, LLABRÉS S, SAUPE D S J, et al. On the binding of Congo red to amyloid fibrils[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2020, 59(21): 8 104-8 107.
- [67] GIRYCH M, GORBENKO G, MALIYOV I, et al. Combined thioflavin T-Congo red fluorescence assay for amyloid fibril detection[J]. *Methods and Applications in Fluorescence*, 2016, 4(3): 034010.
- [68] LI Y, MAURER J, ROTH A, et al. A setup for simultaneous measurement of infrared spectra and light scattering signals: watching amyloid fibrils grow from intact proteins[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 084302.
- [69] COMELLAS G, RIENSTRA C M. Protein structure determination by magic-angle spinning solid-state NMR, and insights into the formation, structure, and stability of amyloid fibrils[J]. *Annual Review of Biophysics*, 2013, 42: 515-536.
- [70] FUJIWARA S, YAMADA T, MATSUO T, et al. Internal dynamics of a protein that forms the amyloid fibrils observed by neutron scattering[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2013, 82: SA019.
- [71] CAO Y P, OLSEN B D. Strengthening and toughening of protein-based thermosets *via* intermolecular self-assembly[J]. *Biomacromolecules*, 2022, 23(8): 3 286-3 295.
- [72] SOLAR M, BUEHLER M J. Tensile deformation and failure of amyloid and amyloid-like protein fibrils[J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(10): 105703.
- [73] MAKSHAKOVA O, BOGDANOVA L, FAIZULLIN D, et al. The ability of some polysaccharides to disaggregate lysozyme amyloid fibrils and renature the protein[J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(2): 624.
- [74] KROES-NIJBOER A, SAWALHA H, VENEMA P, et al. Stability of aqueous food grade fibrillar systems against pH change[J]. *Faraday Discussions*, 2012, 158: 125-138.
- [75] ZHAO Y G, WANG C X, CHANG Y Y, et al. Environmental parameters-dependent rheological behaviors of whey protein fibril dispersions: shear and extensional flow behaviors[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107974.
- [76] HE W Y, HE K, SUN F, et al. Effect of heat, enzymatic hydrolysis and acid-alkali treatment on the allergenicity of silkworm pupa protein extract[J]. *Food Chemistry*, 2021, 343: 128461.
- [77] HU B, SHEN Y, ADAMCIK J, et al. Polyphenol-binding amyloid fibrils self-assemble into reversible hydrogels with antibacterial activity[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(4): 3 385-3 396.

- [78] XU D, ZHOU J T, SOON W L, et al. Food amyloid fibrils are safe nutrition ingredients based on *in-vitro* and *in-vivo* assessment[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6 806.
- [79] 陈慧, 周梦园, 许喆, 等. 蚕豆 11S 蛋白淀粉样纤维化聚集的结构表征及其功能特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2026, 52(1): 277-283.
- CHEN H, ZHOU M Y, XU Z, et al. Structural characterization and functional characteristics of amyloid fibrotic aggregation of 11S protein in fava bean[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2026, 52(1): 277-283.
- [80] FU Y Y, LI Y, WENG S N, et al. Amyloid protein fibrils show enhanced ice recrystallization inhibition activity when serve as Pickering emulsion stabilizer[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 139: 108581.
- [81] ZHU Y Q, HAN Y L, PENG S F, et al. Hydrogels assembled from hybrid of whey protein amyloid fibrils and gliadin nanoparticles for curcumin loading: microstructure, tunable viscoelasticity, and stability[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 994740.
- [82] ROMANO A, ENGELBERG Y, LANDAU M, et al. Alpha-lactalbumin amyloid-like fibrils for intestinal delivery: formation, physicochemical characterization, and digestive fate of capsaicin-loaded fibrils[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108248.
- [83] BAGNANI M, EHRENGRUBER S, SOON W L, et al. Rapeseed cake valorization into bioplastics based on protein amyloid fibrils[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(3): 2200932.
- [84] WEI Z X, DAI S Q, HUANG J Y, et al. Soy protein amyloid fibril scaffold for cultivated meat application[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(12): 15 108-15 119.
- [85] ZHANG Y H, HUANG L H. Effect of heat-induced formation of rice bran protein fibrils on morphological structure and physicochemical properties in solutions and gels[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2014, 23(5): 1 417-1 423.
- [86] ZHOU Q X, LV S X, WANG W Q, et al. Remodeling mechanism of gel network structure of soy protein isolate amyloid fibrils mediated by cellulose nanocrystals[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 332: 121919.
- [87] 白露, 李志明, 张舒, 等. 绿豆球蛋白淀粉样纤维的形成、结构表征及乳化特性[J]. *食品科学*, 2024, 45(7): 43-51.
- BAI L, LI Z M, ZHANG S, et al. Formation, structural characteristics and emulsification properties of mung bean globulin amyloid fibrils[J]. *Food Science*, 2024, 45(7): 43-51.
- [88] PANG S X, SHAO P, SUN Q J, et al. Relationship between the emulsifying properties and formation time of rice bran protein fibrils[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 122: 108985.
- [89] JUNG J M, GUNES D Z, MEZZENGA R. Interfacial activity and interfacial shear rheology of native β -lactoglobulin monomers and their heat-induced fibers[J]. *Langmuir*, 2010, 26(19): 15 366-15 375.
- [90] WAN Z L, YANG X Q, SAGIS L M C. Contribution of long fibrils and peptides to surface and foaming behavior of soy protein fibril system[J]. *Langmuir*, 2016, 32(32): 8 092-8 101.
- [91] 武肖, 刘张涵瑜, 刘硕, 等. 淀粉样蛋白纤维对冷冻猪肉糜品质的影响[J]. *食品科学*, 2024, 45(24): 61-68.
- WU X, LIU Z H Y, LIU S, et al. Effect of amyloid protein fibrils on the quality of frozen minced meat[J]. *Food Science*, 2024, 45(24): 61-68.
- [92] MOOMAND K, LIM L T. Oxidative stability of encapsulated fish oil in electrospun zein fibres[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 523-532.
- [93] TONG X H, CAO J, TIAN T, et al. Changes in structure, rheological property and antioxidant activity of soy protein isolate fibrils by ultrasound pretreatment and EGCG[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 122: 107084.
- [94] 周向军, 李苗. 胰蛋白酶法制备马铃薯蛋白纤维及其结构性质和功能特性研究[J]. *食品与机械*, 2025, 41(4): 54-62.
- ZHOU X J, LI M. Preparation of potato protein fiber by trypsin method and its structural and functional properties[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(4): 54-62.
- [95] VAN DALEN M C E, VANEYCK J, SEMERDZHIEV S A, et al. Protein adsorption enhances energy dissipation in networks of lysozyme amyloid fibrils[J]. *Langmuir*, 2021, 37(24): 7 349-7 355.
- [96] HU B, YU S J, SHI C, et al. Amyloid-polyphenol hybrid nanofilaments mitigate colitis and regulate gut microbial dysbiosis[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 2 760-2 776.
- [97] WEI Z X, WU S H, XIA J J, et al. Enhanced antibacterial activity of hen egg-white lysozyme against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* due to protein fibrillation[J]. *Biomacromolecules*, 2021, 22(2): 890-897.