

脂肪替代物稳定性及其提升技术研究进展

邬思思, 张紫帆, 唐绍峰, 马铁铮*

(北京工商大学食品与健康学院 北京市食品添加剂工程技术研究中心
食品添加剂与配料北京高校工程研究中心 北京 100048)

摘要 脂肪替代物的使用能够降低食品中饱和脂肪酸和胆固醇的摄入水平,然而存在氧化和质构稳定性不良等问题。脂肪替代物体系的稳定性及其调控是影响其在食品工业中应用的重要因素。本文概述脂肪替代物体系稳定性的研究现状,总结提高脂肪替代物氧化和质构稳定性的方法,分析二者之间的关系,并对相关领域的发展趋势进行展望。

关键词 脂肪替代物; 氧化稳定性; 质构稳定性; 组分互作

文章编号 1009-7848(2023)09-0399-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.09.042

脂肪是食物中最重要能量物质之一,可作为脂溶性营养物质的溶剂,还能赋予特征性的质构和风味。然而,动物脂肪含有较高含量的饱和脂肪酸和胆固醇^[1]。大量研究表明,过多的饱和脂肪酸和胆固醇的摄入会提高罹患冠心病、动脉粥样硬化、高血糖等慢性疾病的风险^[2-4]。研发动物脂肪替代物成为食品行业的热点。脂肪替代物不仅可以降低食品中饱和脂肪酸和胆固醇含量水平,含有油脂组分的脂肪替代物还能够优化脂肪酸的配比,从而达到健康膳食的目的^[5]。

多糖、蛋白质和脂类等食品级原料是食品结构化所必需的天然高分子物质,在现代食品工业中发挥着重要的作用。它们在一定条件下可形成乳液或凝胶等结构化形态,是脂肪替代物的主要构成成分^[6]。近年来,随着科研人员的不断努力和探索,部分脂肪替代物已应用于商业化生产。目前,商业化生产的广义脂肪替代物主要包括蛋白质基类、脂肪基类、碳水化合物基类以及混合基类 4 个大类^[7]。然而,能够起到优化脂肪酸配比作用的脂肪替代物只包括脂肪基类和含有油脂组分的混合基类两种。它们含有油脂组分,不仅可以从质构和口感方面模拟动物脂肪,而且在膳食组方

面可以取代动物脂肪,被视为功能更为全面的脂肪替代物。

当脂肪替代物的外部环境条件发生变化,其内部分子间相互作用减弱,并使自身趋于分解状态,能够抵抗外部环境变化而不引起分解的能力就称为脂肪替代物的稳定性,包括贮藏稳定性、烹饪/热加工稳定性和冻融稳定性等^[8]。贮藏稳定性主要是指低温或常温条件下,脂肪替代物分子结构在较长时间对外部环境变化所导致的分解趋势的抵抗能力^[9]。烹饪/热加工稳定性主要是指高温条件下,脂肪替代物分子结构在较短时间对外部环境变化所导致的分解趋势的抵抗能力^[10]。冻融稳定性是指在跨越冰点的温度范围,脂肪替代物分子结构对温度波动变化所导致的分解趋势的抵抗能力^[11]。温度和时间的变化都可能导致脂肪替代物在氧化稳定性和质构特性的变化,进而影响产品品质。稳定性不好将严重限制产品的应用范围。现有商业化生产的脂肪替代物大多只能在低温或蒸煮条件下使用,在油炸条件下难以使用,特别是在蛋白质基类或含有蛋白质原料的混合基类脂肪替代物,其耐热性能难以应用于油炸的高温条件^[12-14]。多数脂肪替代物大多只能在低温乳制品等有限的产品中作为食品配料成分使用^[15]。

为探究脂肪替代物稳定性机理,拓展其应用范围,本文围绕氧化和质构稳定性论述脂肪替代物的研究现状,探讨提高其稳定性的方法,旨在为脂肪替代物稳定性的评价和控制提供理论参考,并展望脂肪替代物的研究和应用前景。

收稿日期: 2022-09-09

基金项目: 北京市属高校高水平教师队伍支持计划青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD 201904029);国家自然科学基金青年科学基金项目(31501408)

第一作者: 邬思思,女,硕士生

通信作者: 马铁铮 E-mail: matiezheng@btbu.edu.cn

1 脂肪替代物的氧化稳定性

氧化稳定性是指物质抵抗氧气或其它具有氧化性的物质作用而保持性质不发生变化的能力,脂肪替代物的氧化稳定性是影响其产品品质的重要因素,在脂肪替代物中加入不饱和程度较

高的植物油脂,可以降低肉制品中饱和脂肪酸含量,然而也会导致产品氧化稳定性的下降^[16]。许多研究通过监测过氧化物、初级或次级氧化产物的变化以及测定 TBARS 等指标来评价脂肪替代物的氧化稳定性,见表 1。

表 1 脂肪替代物氧化稳定性的评价指标

Table 1 Evaluation index for the oxidative stability of animal fat substitutes

评价指标	油脂构成	组织化结构成分	结论
TBARS ^[17]	葵花籽油	鸡肝蛋白、黄原胶	使用脂肪替代物替换动物脂肪,产品在 4℃下贮存 40 d, TBARS 值的增幅显著降低
过氧化物值、TBARS ^[18]	米糠油	角叉菜胶	使用制备的油脂凝胶替换动物脂肪,产品在室温贮存 20 d,过氧化物值和 TBARS 值均显著降低
TBARS ^[19]	橄榄油	奇亚籽粉、明胶蛋白或海藻酸钠	添加有明胶的乳液凝胶的 TBARS 值低于添加有海藻酸钠的乳液凝胶
次级氧化产物、挥发性化合物 ^[20]	橄榄油	大豆分离蛋白	在冷藏条件下储存 60 d,使用脂肪替代物的火腿产品的次级氧化产物和挥发性化合物均显著降低
TBARS、胆固醇氧化产物 ^[21]	葵花籽油	卡拉胶	使用乳液凝胶形式的脂肪替代物替换汉堡包饼中的脂肪成分,产品的 TBARS 值和胆固醇氧化物含量显著降低

1.1 氧化稳定性的影响因素

脂肪替代物氧化稳定性的劣化会导致食品风味和感官等食用品质丧失。其中所含油脂组分氧化,会生成多种具有毒性的氧化产物,危害消费者的身体健康。

脂肪替代物的氧化稳定性受两个因素的影响:一是由于储存时间长(低温、长时),导致脂肪替代物无法保持油脂化学性质稳定,即油脂本身的稳定性不佳;二是由于烹饪/热加工(高温短时)、冻融处理(温度跨越冰点波动)导致油脂氧化速度加快所造成的氧化稳定性劣化^[11]。许多脂肪替代物被作为配料成分添加到肉制品中,它们通常会历经冷冻-融化的过程,而这一过程会使得其中油脂组分的氧化稳定性下降,进而影响产品的质量^[22]。与烹饪或热加工所造成的劣化相比,脂肪替代物在冷冻-解冻过程中的氧化稳定性易被人忽略,因此,冻融条件下的氧化稳定性作为评价脂肪替代物在冷冻食品中适用性能指标非常重要^[23]。

1.2 氧化稳定性的提高方法

为了提高油脂的氧化稳定性,通常在加工和储存过程中采用避光、避氧,降低环境温度,调节水分含量和添加抗氧化剂等措施,或者采用改良

加工方式以提高产品中抗氧化物质含量的方法^[24-25]。对于脂肪替代物而言,提高其氧化稳定性的方法一般包括:1) 选用含有抗氧化能力强的原料^[26];2) 额外添加适当的具有抗氧化功能的成分^[27];3) 通过改良体系的结构和组分间的耦合或交联等作用来增强氧化稳定性^[28]。

1.2.1 原料的选取 选用具有较好抗氧化性能的油脂或组织化结构成分为原料制备脂肪替代物,可使产品具有较好的氧化稳定性。Barros 等^[29]发现使用海藻油和小麦胚芽油制备的脂肪替代物的 TBARS 较低,这是由于两种油脂中所含 α -生育酚含量较高,能够延缓油脂的氧化。De Souto 等^[20]发现大豆分离蛋白中含具有抗氧化活性的多肽,使脂肪替代物产品具有较低的次级氧化产物和挥发性化合物含量,此外,大豆分离蛋白的乳化作用还影响橄榄油乳化体系的粒径,从而延缓自由基传导的链式反应的进行。此外,原料的抗氧化性能与其在脂肪替代物中的形态有关。Pintado 等^[19]发现与使用奇亚籽相比,使用奇亚籽粉为原料制备的脂肪替代物具有更好氧化稳定性,作者认为这主要归因于奇亚籽粉比表面积大,其内部的抗氧化性成分与油脂的作用更加充分。同样的,选取具有

抗氧化性能的乳化剂也能达到提升氧化稳定性的效果。Li 等^[30]发现与使用酪氨酸钠和 Tween80 相比,以茶多糖偶联物为乳化剂制备的玉米油乳化体系,能在高温下更有效抑制油脂成分的氧化降解,作者认为这主要归因于茶多糖偶联物中偶联酚基团的抗氧化活性作用。原料的抗氧化能力及形态都影响脂肪替代物的氧化稳定性。

1.2.2 辅助成分的选取 与选用天然含有抗氧化成分的原料类似,加入抗氧化性成分同样能够提高脂肪替代物的氧化稳定性,常用于添加的成分包括茶多酚、生育酚、绿茶提取物和抗坏血酸等^[31]。曹云刚等^[32]选用菜籽油制备的乳化体系,在猪肉香肠中替代猪脊髓,结果添加 100 mg/kg 的绿茶提取物能有效抑制贮藏过程中的油脂氧化。Freire 等^[33]将角豆果中提取的单宁成分添加到由多不饱和脂肪酸制备的凝胶化乳液中,有效降低了体系中油脂的氧化。李立敏等^[34]发现添加茶多酚除了可以抑制脂肪替代物体系中大豆油的氧化外,还能延缓蛋白质的降解。De Carvalho 等^[35]发现姜黄提取物不仅可以提高脂肪替代物中油脂的氧化稳定性,还能延缓挥发性化合物的生成,改善产品的感官品质。Pintado 等^[36]发现,葡萄籽中提取的酚类物质可以提高脂肪替代物在冷冻储藏过程中的氧化稳定性。由此可见,适当添加辅助成分也是提高脂肪替代物氧化稳定性的有效方法。

1.2.3 结构的优化 乳液体系中油滴的适当分散

可以阻隔自由基的传递,从而阻断油脂氧化的链式反应,双重乳液相比普通乳液具有更好的氧化稳定性^[26]。Kumar 等^[37]发现豌豆荚纤维与芦荟胶复合而成的脂肪替代物,比仅含有豌豆荚纤维的产品具有更好的氧化稳定性,作者认为这是由于芦荟胶和豌豆荚纤维相互作用,产生更强的抗氧化屏障。Abbasi 等^[38]发现添加 1% 黄耆胶的低脂香肠具有更好的氧化稳定性,作者认为多糖与蛋白质在油脂液滴周围形成非共价复合膜结构,抑制了油脂的氧化。由于可以通过共价或非共价相互作用与多酚形成偶联物或复合物,因此乳清蛋白常用于参与脂肪替代物结构的优化和抗氧化性能的提升^[39-41]。通过对脂肪替代物的宏观和微观结构的优化,提升其氧化稳定性。

2 脂肪替代物的质构稳定性

脂肪替代物的质构稳定性同样是影响产品质量的重要因素。脂肪替代物的替代使用通常会改变产品的质构,因此需要优化使其质构与使用动物脂肪的产品更加接近^[42]。脂肪替代物不仅需要具备特定的质构特性,还需在热处理条件下仍能保持这种质构特性,也就是具备质构稳定性^[43]。许多研究通过感官评价和蒸煮损失等宏观指标以及显微结构等微观指标评价脂肪替代物的氧化稳定性,见表 2。

表 2 脂肪替代物质构稳定性的评价指标

Table 2 Evaluation index for the textural stability of animal fat substitutes

评价指标	油脂构成	组织化结构成分	结论
显微结构 ^[9]	大豆油	乳清蛋白	油相体积分数为 60% 时,可得凝胶状乳液,在室温下保存 60 d 不发生相分离
蒸煮损失 ^[17]	葵花籽油	鸡肝蛋白、黄原胶	鸡肝蛋白和黄原胶构成的网络结构限制了液体成分的流动,降低了蒸煮损失
感官评价 ^[19]	橄榄油	奇亚籽粉、明胶蛋白或海藻酸钠	制得的乳液凝胶在 70 °C 贮存 80 min,无明显沉淀和液体析出
显微结构、蒸煮损失 ^[44]	橄榄油	乳清蛋白或酪氨酸钠	制得的 W/O/W 乳液在 4 °C 贮存 7 d,显微结构无显著变化,在肉制品中替代猪脊髓可将烹饪损失减少 30% 以上

2.1 质构稳定性的影响因素

许多食品在加工或烹饪过程中都要经过热处理环节,如杀菌和加热等,这可能会改变不同组分

的结构及其相互作用,脂肪替代物的热力学行为与真实动物脂肪相差甚远,这些都会影响脂肪替代物的质构稳定性^[45-47]。此外,产品在常温贮藏时,

其质构随时间的推移也会逐渐改变^[25]。脂肪替代物的质构稳定性不仅会影响产品的食用品质,还会妨碍其成品率,从而增加生产的成本。提高脂肪替代物的质构稳定性对于食品工业来说具有重要的意义。

影响脂肪替代物的质构稳定性同样受到两方面因素的影响:一是热处理(高温短时)或冻融处理中水分的相变使其结构崩塌,所引发的不可逆变化所导致质构稳定性丧失;二是长时间储存(低温长时)导致脂肪替代物的大分子组分发生物理或化学变化,进而使脂肪替代物无法维持其质构稳定性。

2.2 提高质构稳定性的方法

直接在产品中加入植物油来代替动物脂肪会导致产品质地的软化和质构稳定性的劣化^[48]。食品工业多通过结构化植物油脂来制备脂肪替代物,然而这同样会对质构产生影响^[49]。脂肪替代物在食品基质中形成的网络,以及其与水和脂肪的相互作用都会影响质构稳定性^[37]。对于脂肪替代物而言,提高质构稳定性的方法一般包括:1)筛选或通过改性等得到有助于结构稳定的主辅料^[50-51];2)通过改良体系中组分间的相互作用^[37];3)通过体系宏观或微观结构以及配方的优化^[26]。

2.2.1 使用有助于结构稳定的主、辅料

脂肪替代物的质构特性受脂肪类型的影响,选用性质更稳定的原料以及热不可逆的原料可以更好抵抗温度变化对质构的破坏作用^[50]。Cheetangdee等^[52]发现以不同蛋白质为乳化剂的脂肪替代物具有不同的质构稳定性,以鱼肉分离蛋白为乳化剂制备的脂肪替代物加入香肠可提升其质构稳定性,降低烹饪损失,而以酪蛋白酸钠为乳化剂制备的脂肪替代物加入香肠后反而降低了产品的质构稳定性。Biller等^[53]发现不同喷雾干燥温度处理的乳清蛋白制备的低脂蛋黄酱质构稳定性不同,作者发现喷雾干燥温度为180℃时,乳清蛋白质变性程度较高且乳化性能更好,赋予体系更好的质构稳定性。然而,Werlang等^[54]发现对于燕麦淀粉的热改性处理并没有起到增强低脂蛋黄酱质构稳定性的效果。总之,筛选对质构支撑效果更好的原辅料,或者以适当的方式对原料进行改性,从而优化脂肪替代物的质构特性,都可提升产品的质构稳

定性。

2.2.2 通过组分的相互作用

通过改变并利用蛋白质和多糖等原料大分子在脂肪替代物中的相互作用,可以增强产品的质构稳定性^[55]。Serdaroğlu等^[56]发现明胶和菊粉在所形成牛肉脂肪替代物中的相互作用,有助于提高体系的质构稳定性,将其离心后置于4℃下贮藏7d仍能保持良好的质构稳定性。Ghribi等^[57]发现大豆分离蛋白和*k*-卡拉胶制备的乳脂肪替代物在低脂鲜奶油中使用显示出良好的质构稳定性,作者认为大豆分离蛋白和*k*-卡拉胶形成的三维网络结构赋予体系中气泡界面良好的刚性,从而避免气泡凝结导致的体系失稳。Dos Santos等^[58]发现膳食纤维和猪皮凝胶间的相互作用会延缓水分在所形成乳液凝胶体系中的迁移,从而提高产品的质构稳定性。综上,可以通过蛋白质和多糖等大分子间相互作用的调控来提升脂肪替代物的质构稳定性。

2.2.3 通过宏观和微观结构优化

通过优化脂肪替代物的宏观和微观结构,可以增强脂肪替代物的质构稳定性。将预乳化体系构建的脂肪模拟物应用于香肠产品中,能够减少加工过程中产品质构稳定性的损失^[17]。

脂肪替代物中的大分子物质主要是蛋白质和多糖,它们构成的混合体系的相行为是十分复杂的,而相行为可以决定复合凝胶体系的微观结构和物理性质,进而影响体系的质构稳定性^[59]。通过蛋白质与多糖体系的配方优化,提高它们所构建的脂肪替代物体系的质构稳定性。Zhuang等^[60]研究不同比例的不溶性膳食纤维、魔芋胶和改性淀粉与肌原纤维蛋白复配制备的凝胶体系的质构特性,发现多糖的相行为和水分稳定性显著影响凝胶体系的质构特性和微观结构,如图1所示,形成“阻隔”结构的蛋白质和多糖能截留水分,从而更好地模拟脂肪的质构,并具有良好的质构稳定性。Yang等^[61]使用海藻酸盐和魔芋葡甘聚糖制备乳液凝胶,发现二者质量比低于6:4时凝胶在水中相容性良好,而二者质量比例相同时制备的凝胶具有良好的质构稳定性,适合在低脂蛋黄酱中作为脂肪替代物使用。综上,通过制备工艺或配方的调整,单独或协同优化脂肪替代物的宏观和微观结构,可以有效提升产品的质构稳定性。

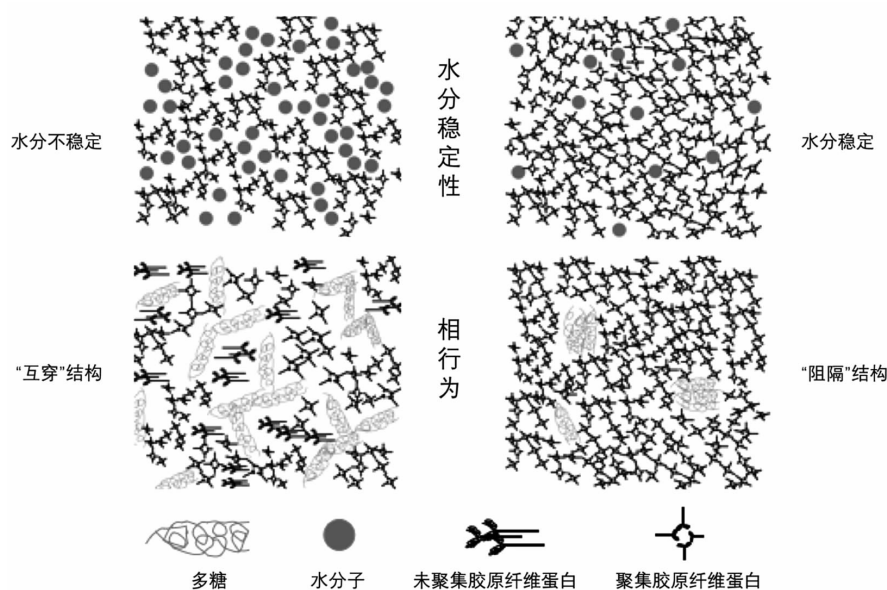


图 1 多糖通过水分稳定性和相行为影响肌原纤维蛋白凝胶特性的模型示意

Fig.1 Schematic model of polysaccharides influenced the myofibrillar protein gel properties through moisture stability and phase behavior

3 脂肪替代物氧化和质构稳定性的相互作用

脂肪替代物的氧化稳定性和质构稳定性并非相互独立,在提升脂肪替代物的氧化稳定性的同时,其质构稳定性会发生不同趋向的变化。Yogesh 等^[26]发现芦荟凝胶的添加可以一并提高低脂肉制品体系的氧化和质构稳定性,这是由于芦荟凝胶本身具有抗氧化能力,属于胶体物质,能够提高质构稳定性。然而,两种稳定性的变化并非具有趋同性。曹云刚等^[32]在肌原纤维蛋白和多糖制备的脂肪替代物体系中添加高含量的绿茶提取物,虽然可以提升氧化稳定性,但是蛋白质和多糖间发生不良聚集,降低了内聚性,从而影响质构稳定性^[34]。

随着脂肪替代物储藏时间的延长,体系中产生的氧化产物可能对脂肪替代物的质构特性产生不良影响。Lu 等^[17]发现采用葵花籽油、鸡肝蛋白和黄原胶制备的脂肪替代物添加到香肠中时,具有良好的质构和氧化稳定性,然而贮藏 40 d 后,油脂氧化破坏了多糖和蛋白质构成的网络结构。除油脂氧化外,脂肪替代物中蛋白质氧化也会导致硬度等质构特性的变化。De Carvalho 等^[35]认为这可能与体系中羰基含量的变化有关。综上,优化脂肪替代物体系的氧化稳定性可能对其质构稳定性

的提升具有协同性。

脂肪替代物体系中,影响氧化稳定性和质构稳定性的因素众多,这些因素间有复杂的关系,如协同性、互斥性,目前对这些因素的影响研究较少。通过研究解明多重因素对氧化和质构稳定性的影响机制,对于脂肪替代物在食品行业的应用具有重大意义。

4 总结与展望

随着人们对膳食营养与健康的重视,以及国家可持续发展战略对降低农产品生产能耗的要求,使用植物油脂替代动物脂肪,研发低脂肪和无脂肪产品是食品行业未来的发展趋势之一。然而,目前脂肪替代物因氧化稳定性和质构稳定性不佳,在食品工业领域的应用受到很大的限制。质构和氧化稳定性是衡量脂肪替代物稳定性的重要标准,二者有紧密的联系。然而,目前对脂肪替代物稳定性的研究还不够深入,对其氧化稳定性与质构稳定性间的关系研究较为欠缺。深入研究脂肪替代物稳定性,有利于其在肉制品、烘焙制品和乳制品等领域的应用。

结合近年来脂肪替代物的发展,推断相关领域未来的研究方向可能包括以下的方面:

1) 新型脂肪替代物体系的创建 现有脂肪替代物体系大多基于凝胶或乳液等连续或分散体系,它们的氧化和质构稳定性各有短长,导致应用范围受限,这有待于食品物理化学等领域基础研究的创新。

2) 新型辅助成分的筛选和应用 天然抗氧化成分和新型食品级乳化剂和胶凝剂的开发和应用研究是食品领域的研究重点,然而应用于脂肪替代物的特定辅助成分的研究还不够深入。

3) 大分子原料精准改性技术的应用 现有物理、化学和酶法改性等技术改变食品中大分子功能特性的研究虽然较多,但是仍然缺乏针对具体脂肪替代物类型的精准大分子改性方法。

4) 大分子互作机制研究 现有研究多聚焦于蛋白质和多糖之间的互作机制对于脂肪模拟物质质的影响,而蛋白质或多糖与油脂之间的互作机制的影响研究尚且较少。

5) 氧化稳定性和质构稳定性的协同效应研究:两种稳定性的协同机制涉及物理化学、食品化学和食品物性学等多学科领域,解明两种稳定性的协同效应需要多学科之间的深度交叉和融合研究。

参 考 文 献

- [1] YAMAGISHI S, MATSUI T. Effects of dietary intake and supplementation of fatty acids on cardiometabolic disorders in humans: A lesson from a large number of meta-analyses[J]. *Letters in Drug Design & Discovery*, 2019, 16(10): 1138-1145.
- [2] BILLINGSLEY H E, CARBONE S, LAVIE C J. Dietary fats and chronic noncommunicable diseases [J]. *Nutrients*, 2018, 10(10): 1385.
- [3] JULIBERT A, DEL MAR BIBILONI M, TUR J A. Dietary fat intake and metabolic syndrome in adults: A systematic review [J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2019, 29(9): 887-905.
- [4] ZHU Y, BO Y, LIU Y. Dietary total fat, fatty acids intake, and risk of cardiovascular disease: A dose-response meta-analysis of cohort studies [J]. *Lipids in Health and Disease*, 2019, 18(1): 1-14.
- [5] CARVALHO BARROS J, MUNEKATA P E S, DE CARVALHO F A L, et al. Use of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) oil emulsion as animal fat replacement in beef burgers[J]. *Foods*, 2020, 9(1): 44.
- [6] 陈欢, 曹婷, 唐清苗, 等. 基于碳水化合物的低热量脂肪模拟物研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(11): 187-195.
CHEN H, CAO T, KANG Q M, et al. Progress of the research on carbohydrate-based low-calorie fat substitutes [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(11): 187-195.
- [7] 高艳蕾, 张丽, 余群力, 等. 动物脂肪替代物及其在肉制品中的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(15): 315-324.
GAO Y L, ZHANG L, YU Q L, et al. Animal fat substitutes and their applications in meat products[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(15): 315-324.
- [8] ZHANG Q, WU K, QIAN H, et al. The advances of characterization and evaluation methods for the compatibility and assembly structure stability of food soft matter[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 112: 753-763.
- [9] LIU Y, ZHANG W, WANG K, et al. Fabrication of gel-like emulsions with whey protein isolate using microfluidization: Rheological properties and 3D printing performance[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(12): 1967-1979.
- [10] MIAO J, XU N, CHENG C, et al. Fabrication of polysaccharide-based high internal phase emulsion gels: Enhancement of curcumin stability and bioaccessibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106679.
- [11] RAHMATI N F, TEHRANI M M, DANESHVAR K, et al. Influence of selected gums and pregelatinized corn starch on reduced fat mayonnaise: modeling of properties by central composite design[J]. *Food Biophysics*, 2015, 10(1): 39-50.
- [12] 周士琪, 刘雪, 刘少伟, 等. 复乳凝胶作为脂肪替代物对鸡肉肠理化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 7-14.
ZHOU S Q, LIU X, LIU S W, et al. Effect of double emulsion gels as fat replacers on the physicochemical properties of chicken sausage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 7-14.
- [13] 周士琪. 海带多糖复乳凝胶脂肪替代物的制备及其在低脂鸡肉肠中的应用[D]. 上海: 华东理工大学,

- 2020.
- ZHOU S Q. Preparation and physicochemical properties of double emulsion gels and its application in chicken sausages[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.
- [14] 杨扬, 张玲玲, 李永祥, 等. 蛋白质基质脂肪模拟物制备方法及其应用的研究进展[J]. 中国油脂, 2017, 42(5): 28–33.
- YANG Y, ZHANG L L, LI Y X, et al. Advance in preparation and application of protein-based fat mimetic[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(5): 28–33.
- [15] 赵锦妆, 周梦舟, 徐群英. 脂肪替代物在食品中的研究进展[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 157–160.
- ZHAO J Z, ZHOU M Z, XU Q Y. Process in fat substitutes used in food[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(11): 157–160.
- [16] 代思奇. 玉木耳和银耳作为脂肪替代物对猪肉香肠品质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
- DAI S Q. Effects of *Auricularia cornea* and *Tremella* as fat substitutes on the quality of pork sausages[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.
- [17] LU Y, CAO J, ZHOU C, et al. The technological and nutritional advantages of emulsified sausages with partial back-fat replacement by succinylated chicken liver protein and pre-emulsified sunflower oil[J]. LWT, 2021, 149: 111824.
- [18] CHAIJAN M, CHEONG L Z, PANPIPAT W. Rice bran oil emulgel as a pork back fat alternate for semi-dried fish sausage[J]. PloS One, 2021, 16(4): e0250512.
- [19] PINTADO T, RUIZ-CAPILLAS C, JIMÉNEZ-COLMENERO F, et al. Oil-in-water emulsion gels stabilized with chia (*Salvia hispanica* L.) and cold gelling agents: Technological and infrared spectroscopic characterization[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 470–478.
- [20] DE SOUTO V O, SANTOS M M F, LIMA D A S, et al. Olive oil-in-water emulsion as a source of desirable fatty acids in free-range ‘Caipira’ chicken ham[J]. LWT, 2021, 144: 111216.
- [21] POYATO C, ASTIASARÁN I, BARRIUSO B, et al. A new polyunsaturated gelled emulsion as replacer of pork back-fat in burger patties: Effect on lipid composition, oxidative stability and sensory acceptability[J]. LWT, 2015, 62(2): 1069–1075.
- [22] PINTADO T, HERRERO A M, JIMÉNEZ-COLMENERO F, et al. Emulsion gels as potential fat replacers delivering β -glucan and healthy lipid content for food applications[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(12): 4336–4347.
- [23] 李方斯. 大米蛋白与核桃蛋白异源共架体的构建及其在高内相乳液制备中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- LI F S. Construction of co-assembly hybrid composites by rice proteins and walnut proteins and its application in the preparation of high internal phase emulsions[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [24] 贾星宏, 巩芳娥. 核桃油储藏氧化稳定性研究进展[J]. 中国食品, 2021(17): 114–115.
- JIA X H, GONG F E. Research progress on oxidative stability of walnut oil in storage[J]. China Food, 2021(17): 114–115.
- [25] 王欣, 徐宝成, 罗登林, 等. 植物源天然抗氧化物质基本特征及其在食用油中的应用研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 135–143, 154.
- WANG X, XU B C, LUO D L, et al. Basic characteristics of plant-derived natural antioxidants and their application in edible oils: a review[J]. Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.), 2022, 50(4): 135–143, 154.
- [26] KUMAR Y, KUMAR A, VISHWAKARMA R K, et al. The combined effects of multiple emulsion, plant gel, and fibers from pea pods on the characteristics of low-fat meat batter[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(4): e15298.
- [27] HONG S, JO S, KIM M J, et al. Addition of sesamol increases the oxidative stability of beeswax organogels and beef tallow matrix under UV light irradiation and thermal oxidation[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(5): 971–979.
- [28] ABD EL-MAKSOU D A A, ABD EL-GHANY I H, EL-BELTAGI H S, et al. Adding functionality to milk-based protein: Preparation, and physico-chemical characterization of β -lactoglobulin-phenolic conjugates[J]. Food Chemistry, 2018, 241: 281–289.
- [29] BARROS J C, MUNEKATA P E S, DE CARVALHO F A L, et al. Healthy beef burgers: Effect of animal fat replacement by algal and wheat germ oil emulsions[J]. Meat Science, 2021, 173: 108396.
- [30] LI Q, SHI J, LI J, et al. Influence of thermal

- treatment on the physicochemical and functional properties of tea polysaccharide conjugates[J]. *LWT*, 2021, 150: 111967.
- [31] 周绪霞, 陈婷, 吕飞, 等. 茶多酚改性对蛋清蛋白凝胶特性的影响及机理[J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 13-18.
ZHOU X X, CHEN T, LÜ F, et al. Effect and mechanism of modification with tea polyphenols on the gel properties of egg white protein[J]. *Food Science*, 2018, 39(16): 13-18.
- [32] 曹云刚, 李颖, 郭安琪, 等. 绿茶提取物添加及脂肪替代对低脂猪肉香肠品质及脂质氧化稳定性的影响(英文)[J]. *食品科学*, 2021, 42(4): 94-99.
CAO Y G, LI Y, GUO A Q, et al. Incorporation of green tea extract and partial replacement of fat to modify the quality and lipid oxidative stability of reduced-fat pork sausage[J]. *Food Science*, 2021, 42(4): 94-99.
- [33] FREIRE M, COFRADES S, PÉREZ-JIMÉNEZ J, et al. Emulsion gels containing n-3 fatty acids and condensed tannins designed as functional fat replacers[J]. *Food Research International*, 2018, 113: 465-473.
- [34] 李立敏, 杨豫菘, 成立新, 等. 茶多酚对羊肉肌原纤维蛋白-多糖复合体系乳化及质构特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(8): 67-77.
LI L M, YANG Y S, CHENG L X, et al. Effect of tea polyphenols on emulsifying and textural properties of mutton myofibrillar protein-polysaccharide composite[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(8): 67-77.
- [35] DE CARVALHO F A L, MUNEKATA P E S, DE OLIVEIRA A L, et al. Turmeric (*Curcuma longa* L.) extract on oxidative stability, physicochemical and sensory properties of fresh lamb sausage with fat replacement by tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) oil[J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109487.
- [36] PINTADO T, MUÑOZ-GONZÁLEZ I, SALVADOR M, et al. Phenolic compounds in emulsion gel-based delivery systems applied as animal fat replacers in frankfurters: Physico-chemical, structural and microbiological approach[J]. *Food Chemistry*, 2021, 340: 128095.
- [37] KUMAR Y, TYAGI S K, VISHWAKARMA R K, et al. Textural, microstructural, and dynamic rheological properties of low-fat meat emulsion containing aloe gel as potential fat replacer[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20 (sup1): S1132-S1144.
- [38] ABBASI E, SARTESHNIZI R A, GAVLIGHI H A, et al. Effect of partial replacement of fat with added water and tragacanth gum (*Astragalus gossypinus* and *Astragalus compactus*) on the physicochemical, texture, oxidative stability, and sensory property of reduced fat emulsion type sausage[J]. *Meat Science*, 2019, 147: 135-143.
- [39] BABA W N, MCCLEMENTS D J, MAQSOOD S. Whey protein-polyphenol conjugates and complexes: Production, characterization, and applications [J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130455.
- [40] CHEN Y, HUANG F, XIE B, et al. Fabrication and characterization of whey protein isolates-lotus seedpod proanthocyanin conjugate: Its potential application in oxidizable emulsions[J]. *Food Chemistry*, 2021, 346: 128680.
- [41] LIU F, SUN C, YANG W, et al. Structural characterization and functional evaluation of lactoferrin-polyphenol conjugates formed by free-radical graft copolymerization[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(20): 15641-15651.
- [42] SCHOLLIERS J, STEEN L, FRAEYE I. Partial replacement of meat by superworm (*Zophobas morio* larvae) in cooked sausages: Effect of heating temperature and insect: Meat ratio on structure and physical stability[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102535.
- [43] 高娜, 黄俊逸, 李聪, 等. 响应面法优化乳化型热不可逆复合凝胶配方[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(2): 71-77.
GAO N, HUANG J Y, LI C, et al. Optimization of emulsified thermoreversible composite gel formula by response surface methodology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(2): 71-77.
- [44] COFRADES S, ANTONIOU I, SOLAS M T, et al. Preparation and impact of multiple (water-in-oil-in-water) emulsions in meat systems[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 338-346.
- [45] LIU F, WANG D, SUN C, et al. Utilization of interfacial engineering to improve physicochemical stability of β -carotene emulsions: Multilayer coatings formed using protein and protein-polyphenol conju-

- gates[J]. Food Chemistry, 2016, 205: 129–139.
- [46] DREHER J, KÖNIG M, HERRMANN K, et al. Varying the amount of solid fat in animal fat mimetics for plant-based salami analogues influences texture, appearance and sensory characteristics [J]. LWT, 2021, 143: 111140.
- [47] CÂMARA A K F I, OKURO P K, DA CUNHA R L, et al. Chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage as a new fat substitute in emulsified meat products: Technological, physicochemical, and rheological characterization[J]. LWT, 2020, 125: 109193.
- [48] KILIÇ B, ÖZER C O. Effects of replacement of beef fat with interesterified palm kernel oil on the quality characteristics of Turkish dry-fermented sausage[J]. Meat Science, 2017, 131: 18–24.
- [49] SHIN D J, LEE H J, LEE D, et al. Fat replacement in chicken sausages manufactured with broiler and old laying hens by different vegetable oils [J]. Poultry Science, 2020, 99(5): 2811–2818.
- [50] 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.
- [51] FERNANDES S S, MELLADO M M S. Development of mayonnaise with substitution of oil or egg yolk by the addition of chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(1): 74–83.
- [52] CHEETANGDEE N. Effect of partial replacement of porcine fat with pre-emulsified soybean oil using fish protein isolate as emulsifier on characteristic of sausage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(7): 1901–1909.
- [53] BILLER E, WASZKIEWICZ-ROBAK B, LONGO E, et al. Effects of the addition of spray-dried whey on the stability of fat-reduced mayonnaise-type emulsions during storage[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2018, 95(3): 337–348.
- [54] WERLANG S, BONFANTE C, ORO T, et al. Native and annealed oat starches as a fat replacer in mayonnaise[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15211.
- [55] GAO X, ZHANG W, ZHOU G. Emulsion stability, thermo-rheology and quality characteristics of ground pork patties prepared with soy protein isolate and carrageenan[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(14): 2832–2837.
- [56] SERDAROĞLU M, NACAĞ B, KARABIYIKOĞLU M. Effects of beef fat replacement with gelled emulsion prepared with olive oil on quality parameters of chicken patties[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2017, 37(3): 376.
- [57] GHRIBI A M, ZOUARI M, ATTIA H, et al. Study of protein/k-carrageenan mixture's effect on low-fat whipping cream formulation [J]. LWT, 2021, 147: 111647.
- [58] DOS SANTOS M, 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]. LWT, 2020, 120: 108895.
- [59] 李安琪, 尚静, 李前进, 等. 基于蛋白质、多糖混合体系的食品凝胶结构设计策略[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 344–352.
- LI A Q, SHANG J, LI Q J, et al. Design principles of food gel structures based on mixed polysaccharide and protein solutions[J]. Food Science, 2021, 42(13): 344–352.
- [60] ZHUANG X, WANG L, JIANG X, et al. The effects of three polysaccharides on the gelation properties of myofibrillar protein: Phase behaviour and moisture stability [J]. Meat Science, 2020, 170: 108228.
- [61] YANG X, GONG T, LU Y, et al. Compatibility of sodium alginate and konjac glucomannan and their applications in fabricating low-fat mayonnaise-like emulsion gels[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115468.

Recent Progress on Fat Substitutes Stability and Their Improvement Techniques

Wu Sisi, Zhang Zifan, Tang Shaofeng, Ma Tiezheng*

(School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives, Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Food Additives and Ingredients, Beijing 100048)

Abstract The application of animal fat substitutes can reduce the intake levels of saturated fatty acids and cholesterol in food, but there are a series of problems including poor oxidative and textural stability. The animal fat substitute stability and its regulation are important factors affecting their application in food industry. The research status of animal fat substitute oxidative and textural stability and their improvement methods were summarized, and the interactions between oxidation stability and textural stability were analyzed. The development trends and prospects in relevant fields were also discussed and analyzed.

Keywords animal fat substitutes; oxidative stability; textural stability; component interactions