

物理场辅助改性蛋白复合体系及其在食品抗菌中的应用

钱 圣, 兰天彤, 宋亭喻, 张 浩*, 刘景圣

(吉林农业大学食品科学与工程学院 小麦和玉米深加工国家工程研究中心 长春 130118)

摘要 食物一直是人们赖以生存的资源,而蛋白质又是构成食物重要的一部分。蛋白质在提供给人日常能量的同时,也为食物中的某些菌类提供了栖息环境。若不加以控制,不仅会导致食物的腐败和变质,也会对人类的饮食安全造成很大的威胁。传统方法中,人们通常是对食物的表面进行消杀或通过食品加工过程中加入抑菌剂等措施来抑制菌群的生长。然而,这些方法存在着明显的弊端,即消杀药剂中的化学物质会残留在食物表面并被人群摄入,不符合当今人们对食品安全性的高标准要求。随着蛋白改性方向的研究逐渐成熟,很多蛋白改性方法也进入人们视线中。物理场是对蛋白质进行改性的众多方法中的一种,这种方法相比于一些传统方法无疑更加新颖,且相比于传统消杀方法更具有安全性。最近的一些研究证实物理场改性的蛋白,其抗菌性确有提升。本文在梳理物理场改性蛋白提升食品抗菌性相关研究的同时,也为此方向的研究提供新的思路和创新点。

关键词 食品; 蛋白质; 物理场; 改性; 抗菌性

文章编号 1009-7848(2023)12-0362-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.12.036

现如今,超声场、高压场以及静电场等物理场已广泛应用于食品加工以及食品改性领域,其用途主要在于食品营养物质的提取以及通过改性来拓宽食品的应用领域。食品是一个由多种营养物质构成的多聚体,这些物理场的存在会使得食品中的各个成分相互作用,进而可以改变食品中某些成分的结构,导致这些成分可能具有原本不具备的能力或者使得原本具有的某种性质出现增长、削减。而对于食品这个复合体来说,一种成分的改变也将导致其余成分改变,即成分之间出现协同、拮抗作用的现象。这种现象的出现可为食品体系中抗菌性的改变提供契机。本文通过整理近年关于此方面的研究,在理论结合实践的基础上展望未来的发展方向,同时也为食品安全领域的研究提供新的思路。

1 蛋白质改性研究现状

蛋白质是人类赖以生存的基石,具有多种多样的结构和功能^[1-2];正确的蛋白质折叠和其它分子组装会产生适宜的功能,而错误的折叠和聚集则会出现功能障碍。由于蛋白质是氨基酸通过连

接再经过折叠等方式进行排列最终形成空间结构的产物(图 1),故其性质与微观结构息息相关。不同的结构会赋予蛋白质不同的功能特性,但是一些特定的结构并非很多蛋白质天生所具有,对于此类问题,研究人员正致力于利用物理、化学等方法改善蛋白质的功能特性。这些处理通常旨在增加蛋白质的溶解性、乳化性、起泡性、增稠性和/或凝胶特性^[3]。目前主要是通过改变蛋白质存在的外界环境来达到目的,外界环境的改变会使得蛋白质原本的结构发生改变。最初人们使用了超声场、热力场、压力场以及微波场等经典物理场对蛋白质进行改性,随着物理场构建技术的成熟,人们开始倾向于复合场,即多个物理场或物理场与化学场复合的方式来实现蛋白质的改性。

由于食品体系是一个典型的蛋白质、多糖、多酚等物质共同构成的物质体系^[4],多酚类物质可以通过共价和非共价的相互作用改变蛋白质的相关结构^[5]。通过多酚与蛋白质相互作用的经典体系,国内外开展了很多蛋白质改性方面的研究。Shi 等^[6]通过以玉米醇溶蛋白(Zein)负载白藜芦醇(RES)制备了玉米醇溶蛋白/SHA 纳米粒开展了其对体外抗氧化和抗肿瘤的研究,结果表明:胶囊化的白藜芦醇比游离白藜芦醇具有更高的体外抗氧化活性且在小鼠乳腺癌细胞测试时,胶囊化的白藜芦醇也显示出比游离白藜芦醇更高的抗增殖

收稿日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072169)

第一作者: 钱圣,男,硕士生

通信作者: 张浩 E-mail: zhanghao3318@sina.com

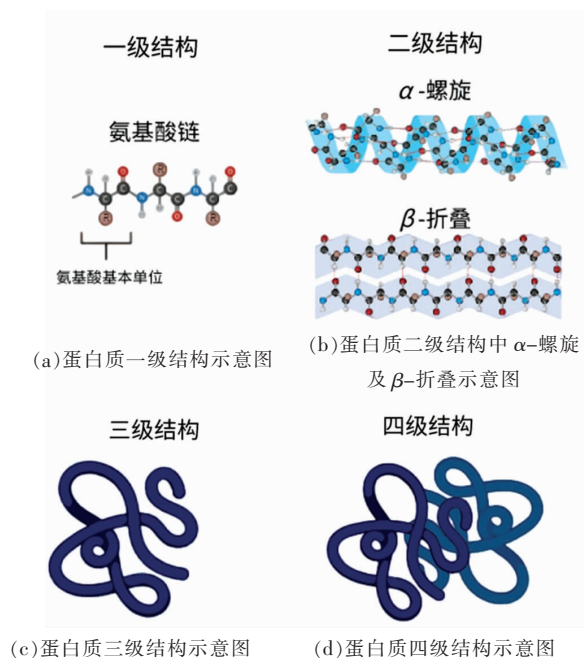


图 1 蛋白质基本微观结构

Fig.1 Basic microstructure of protein

活性。且此产品可能比较适用于功能性食品和医药产品。对于目前的很多研究来说,大多数都致力于研究生产新型产品以及体系的结构,而物理场对蛋白质改性进而实现抗菌性改变的相关报道却较少。

关于物理场使蛋白质改性能够实现体系抗菌性的提升,是因为有些物理场自身具有一定的杀菌能力的同时,也能使得一些蛋白质衍生出特定的抗菌结构。起始的一些相关研究提出使用酶法改性或化学改性的方法,而这两种方法的化学残留物成本较高,所以对于蛋白质的改性逐渐从化学和生物方法转化成物理方法,因为涉及到污染较小,所以物理层面的技术通常被认为是安全度较高的^[7]。

2 关于物理场对于蛋白体系改性的研究现状

一直以来,人们都希望通过改变蛋白质的微观结构从而实现食品加工上的突破,从起始加入食品添加剂,到今天的物理场改性,这其中不但克服了传统食品加工的局限性^[8],同时也为食品安全增添了一份保障。近几年随着人们对高品质食品的需求不断增长,超声波、高压均质以及脉冲电场

等物理场已应用于食品加工产业^[9],以此来提升食品的品质。然而相关研究却发现若使用物理场对蛋白进行过度处理,将会有一定几率导致一些极端的物理或化学变化的发生。例如,Soria 等^[10]发现极端热处理会导致蛋白质分子的聚集和溶液性质的恶化。但若是改变处理条件则会避免这种情况的发生,邓爱华等^[11]通过超声波处理了葵花籽,结果发现,与未处理的葵花籽蛋白相比,超声波处理后,当超声功率为 700 W 时,葵花籽蛋白的溶解性、乳化性和起泡性都有了不同程度的提高;超声功率为 500 W 时泡沫稳定性和持油性也有了一定程度的提高。由此可知,超声波处理可以较好地改善葵花籽蛋白的功能特性,且功能特性的改变和超声处理的功率息息相关。范金波等^[12]通过研究超声波处理对绿原酸(CGA)和牛血清白蛋白(BSA)结合作用的影响发现:在超声频率 53 kHz 时,超声处理使 CGA-BSA 复合物的构象发生一定改变,并对 CGA 与 BSA 的结合有增强作用,而不会改变反应的作用力类型。以上研究充分说明了物理场对于一些蛋白质的改性有积极的一面,具体表现为其一些功能特性得到了不同程度的提高。

目前国内外对于蛋白质改性的研究远不止于对单一蛋白的改性,而是更倾向于研究对蛋白体系的改性。Zhao 等^[13]通过红豆蛋白与叶黄素结合证明了超声处理通过疏水作用促进红豆蛋白与叶黄素的非共价结合,使结合位点比酪氨酸更接近色氨酸。这说明超声处理会导致蛋白的内部结合位点暴露,亦证明了蛋白质本身的二级、三级结构发生了改变。而 Quan 等^[14]指出,高压均质处理可能会增加柚子和猕猴桃汁中的酚类化合物,但酚类生物可利用性严重降低。张艳艳等^[15]在研究静电场辅助冷冻对面筋蛋白品质和分子结构影响时,发现经过静电场处理过的与传统冷冻方式相比,静电场辅助冷冻提高了面筋蛋白的黏弹特性、变性温度(T_p)和变性焓(ΔH)。这都充分说明了物理场对于蛋白体系改性确实具有积极作用。

3 超声波对食品成分改性的影响

3.1 超声波改性食品成分

3.1.1 超声波技术 超声波是指一种机械波,其

振动频率范围为 16~10 MHz。根据超声频率和功率强度,可分为低功率高频超声波(1~10 MHz, <1 W/cm²)和高功率低频超声波(16~100 kHz, 10~1 000 W/cm²)^[16]。超声波目前在食品成分的提取,食品的加工以及对于食品成分的改性都有着广泛的应用,小于 100 kHz 的超声波通常用于食品加工^[17]。有人发现食品在加工过程中,随着超声波功率的改变以及作用时间的延长,食品的性质会出现不同程度的改变。虽然超声波的基础理论以及在食品产业一些领域的应用上已经较为成熟,但是仍有一些超声波技术只存在于试验测试阶段,因为其对于食品的改性不稳定,难以控制,故仍需要进一步的研究和探索。

3.1.2 超声波对食品成分的改性 经过相关研究,已经证实了超声波处理可以有效增强食品以及食品相关产品的性质。赵晓彤等^[18]通过超声波处理大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)、聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)、纳米纤维素(nanocellulose, NCC)为主要原料制备的纳米复合膜,结果表明:经超声处理的纳米复合膜具有良好的包装性能,且与纯 SPI 膜和未经超声处理 SPI/PVA/NCC 复合膜相比,经超声处理的 SPI/PVA/NCC 复合膜表面更为平整,内部网状结构更加致密,且具有疏水性;将其应用于圣女果保鲜中,可更有效保持圣女果的硬度、水分、可溶性固形物质量分数以及 VC 含量。Gregersen 等^[19]在研究高强度超声波对加速酸性凝胶的形成和乳清蛋白变性时发现,这两者均和乳脂球膜的变化,即酪蛋白与乳脂球膜的结合增加有关。一般来说,高强度物理场在处理蛋白质体系时,很容易导致蛋白质的改性走向消极的一面,原因是高强度物理场会破坏蛋白质中原有的相互作用,导致其原本的结构被打散。而上述研究已经表明,不同种类食品的改性均需要不同强度的物理场进行辅助方能达到目的。

3.1.3 超声波对蛋白体系的改性 在超声波处理蛋白体系的时候,传播介质中的气芯体积通过稀疏波和压缩波的增加,会形成空腔,空腔周期性振荡并逐渐扩大,直到动态高速过程分解^[20]。气泡振荡和破裂过程中的能量转移,产生搅拌、瞬时高压和高温,还会形成冲击波、剪切力、微喷射、声流和

自由基,这即是超声波能对蛋白质改性的主要原因^[21]。超声波主要改变蛋白质的二级结构和三级结构。Zhao 等^[22]通过研究了超声处理对大豆分离蛋白(SPI)和麦芽糊精(MD)形成的共轭物的结构、理化特性和酸诱导凝胶特性的影响。发现在特定功率处理 5 min 促进了原本体系的糖基化反应,导致共轭物的 β 型有序二级结构增加,三级构象减少。共轭物的等电点、表面疏水性(H_0)、游离巯基(-SH)和粒径均增加。而当时间增加到 15 min 或 25 min 会通过促进糖基化反应和降低 H_0 来削弱共轭物的凝胶特性。Yu 等^[23]证实了超声波处理可以通过提高美拉德反应的效率来提高蛋白质的接枝率(GD)。以上研究说明了超声波对于蛋白体系的改性,处理时间是很重要的因素,随着时间的增加,蛋白体系的原有结构会被空化作用产生的巨大能量破坏得愈发严重(图 2a),进而导致其性质下降或丧失。

从另一方面来看,超声波在扩大蛋白体系的使用也做出了很大的贡献。根据研究表明,与传统碱提酸沉法相比,超声辅助法得到的豌豆蛋白起泡性和起泡稳定性都具有不同程度的提高^[24]。这其中的一个原因可能是在超声波的作用下,蛋白体系内部的疏水基团暴露,增大了空气与界面的相互作用^[25]。超声波的影响远不止于此。Xue 等^[26]在研究超声改性蛋清蛋白凝胶(UEP)和茶多酚(TP)辅助超声改性蛋清蛋白凝胶(TUEP)的质构、理化性质、二级结构和微观结构的变化时,发现随着超声功率的增加,TUEP 和 UEP 的可溶性蛋白质、表面疏水性和二硫键呈增加趋势的同时,且超声处理在一定程度上也提高 TUEP 和 UEP 的硬度和保水性。超声波对于蛋白体系的改性主要是通过改变蛋白体系的二级和微观结构,进而实现性质的改变,对于不同种类的蛋白,其改性幅度以及改性方向区别较大。近些年大多与酶法联合改性蛋白体系,由于酶对于底物的作用,导致空化作用进一步增强,实现更大程度的改性。

3.2 超声波与其它场复合改变的食品抗菌性

超声波改变食品抗菌性的研究,主要体现在内与外两个方面。内部处理即是超声波直接作用于食品成分,从而达到食品本身获得抗菌性或者提高其抗菌性的目的。Cao 等^[27]也证实了超声波可

以在一定程度上提高干大麦草的微生物安全性和贮藏稳定性。随着超声波技术的成熟,多数都是通过与热力场的联合进行灭菌,Silva 等^[28]证实了热超声处理时温度的增加受到水蒸汽张力增加的限制,水蒸气张力的增加降低了空化效应。增加外部压力可能会增加气泡内爆的能力,从而使微生物失活。对外则是通过制作食品抗菌膜抑制菌种的生长和繁殖,其原理是将活性化合物释放到食品包装中,以防止不良微生物的生长^[29-30]。Zhen 等^[31]的研究表明,蛋白基抗菌膜不但具有替代传统塑料包装的潜力,而且随着纳米技术,活性包装的技术越发成熟,蛋白基抗菌膜也会得到进一步的优化。可食用复合膜是指选取两种或者两种以上的材料为基底,通过干燥、静电纺丝等工艺手法制作而成^[32],但是很多的可食膜存在脆性高、水溶解性高和水蒸气阻隔性低及因两相的基团极性的差异导致的抗菌膜体系相容性较差等问题^[33]。Zhang 等^[34]通过研究了聚环氧乙烷(PEO)和玉米贮藏蛋白玉米醇溶蛋白的蛋白质聚合物溶液中电纺形态,阐述了具有不同的溶剂性质的混合液会产生不规则的电纺形态。Shi 等^[35]通过其研究指出了溶液的结构、流变性与由蛋白质和聚合物组成的电纺纤维毡(EFM)形态之间的明确关联。金晓春等^[36]研究了玉米醇溶蛋白/聚环氧乙烷同轴静电纺丝负载姜黄素及其释放特性,且对于抗菌性的研究发现了金黄色葡萄球菌比大肠杆菌的对姜黄素含量更敏感。同轴静电纺丝制得的负载姜黄素纳米纤维可用于功能性食品及生物医用产品的保鲜及贮藏。而通过超声处理之后可以改变物质的起泡性和粒径,且超声对蛋白的三级结构也有改性作用。超声处理会降低总巯基的含量,增加了化合物暴露巯基的含量。通过超声波处理,可以产生水解度更高,抗菌活性更强的产品。无论是内部处理还是外部处理其主要原理都在于通过破坏菌种的生存环境实现抗菌性的提升(图 3a),超声处理或超声与热力场等物理场联合处理是食品领域未来的发展方向,相比于传统灭菌,在保证菌落致死率的同时又具备高效便捷的特点,无论是对于食品加工还是对于食品方向的研究都有积极的意义。

4 压力场对食品成分改性的影响

4.1 高压均质对食品成分的改性

4.1.1 高压均质技术 由于近些年植物型蛋白的兴起,在某些方面逐渐取代了动物型蛋白,但是植物型蛋白相较动物型蛋白也存在着一些缺点,而这些缺点均需要一些改性的方法来解决。就目前研究来看,大致分为三类,包括化学方法(即糖基化、酰化、琥珀酰化、脱酰胺、pH 值控制和磷酸化)^[37]、生物方法(发酵和酶水解)和物理加工(即热处理和挤压蒸煮)^[38]。这些方法大多耗时、成本高、能耗大,这限制了它们在食品工业中的广泛和迅速应用^[39]。近年来,非均相加工技术,如高压均质技术(HPH)受到工业界和学术界的广泛关注,并被广泛应用于食品生物聚合物分子结构、理化性质以及一些技术功能的改性^[40]。这种技术最初主要被应用于改变蛋白体系的乳化性,溶解性等方面,例如 Kang 等^[41]研究了不同均质压力水平对大豆 11S 球蛋白的溶解度、粒径、表面疏水性、游离巯基含量、表面张力、水分分布和流动性、流变性、起泡性和凝胶性能的影响,结果表明高压均质改善了 11S 球蛋白的物理化学、发泡和凝胶特性。Zhang 等^[42]表明了 HPH 会改变香附蛋白乳液的粒径,粒径会随着压力的升高而减小,且 HPH 处理降低了乳液的表观黏度,增加了乳液的流动性。近年来 HPH 技术已经在食品领域得到了广泛的应用,属于应用很成熟的压力场。

在 HPH 处理的过程中,连续流动的流体或悬浮液会经过一个狭窄的间隙,从而导致高湍流和剪切应力^[43]。这些作用会使得蛋白质的原本性质发生不同程度的改变:最明显的即是颗粒的大小会发生改变,直接会造成蛋白质的溶解性和乳化性的改变。目前高压均质技术虽已经广泛应用,但是缺陷也较为明显,无法应对一些复杂的情况,而面对这些情况时,最典型的解决办法就是与其余的物理场复合,例如高压静电场,无论是在材料生产方面还是在蛋白改性处理方面,都具有重大且深远的意义。

4.1.2 高压均质对食品方向的改性 高压均质技术最早应用于食品的杀菌和储藏等领域,随着有研究证明高压处理可以提高蛋白质的表面疏水性

和活性巯基含量,人们逐渐开始使用高压均质技术对蛋白体系进行改性。因为高压均质通过剪切、空穴、湍流等作用,在降低粒度、提升果汁物理稳定性及外观品质的同时还具有杀菌钝酶、维持果汁营养品质等效果^[44-45]。而为了使液体材料均质或乳化,将采用高压均质(HPH)迫使样品通过细孔,通过剪切力和伸长应力使液滴破碎并使颗粒分离^[46]。Chen等^[47]为拓宽大豆分离蛋白(SPI)凝胶纹理辅助材料的使用,选择了在凝胶系统中引入HPH方法制备了稳定的带正电的甲壳素纳米纤维(CNF)悬浮液。结果表明,加入此纤维之后体系形成凝胶的时间减少,凝胶浓度变低以及凝胶强度增加。虽然在本文中作者设置了定性参数,若改变此参数,此凝胶体系是否仍能稳定不得而知。但是也为此方向的研究提供了方向。Durmus等^[48]研究了高压均质对牛乳冰淇淋的改性,结果表明,HPH增加了混合料的硬度和稠度值,但降低了黏结性和黏度值指数,HPH降低了超限率。HPH显著提高了冰淇淋的抗融化性。这说明高压均质可以改善冷冻乳制品,有作出新型冷冻乳制品的前景,但本文中选择了30,60,90,120 MPa及150 MPa的压力作为试验组的指标,0 MPa作为对照,结果显示除HPH-150外,HPH处理的混合样品的平均粒径均低于对照组。这个结果向我们展示了HPH存在着和超声类似的弊端,功率参数的设定尤其重要,即产品的质量与处理的条件息息相关。

4.1.3 高压均质对蛋白的改性

高压均质在食品工业中被广泛用于生产乳化食品,如软饮料、牛奶和敷料^[49]。除此之外,已有研究证实它可以起到改性蛋白质的作用。郭增旺等^[50]阐述了高压均质技术对大豆蛋白热聚集结构和乳化特性的影响,其中提到了大豆在低压力高压均质的作用下,热聚集体粒径和浊度逐渐增大、骨架结构变密、无序结构增多,并且发生再聚集,其疏水性降低, ζ -电位绝对值和二硫键含量升高,进而导致乳化活性提高。而高压力的均质处理会导致热聚集体的二硫键和骨架结构发生大量断裂,分子结构展开,疏水性位点大量暴露,导致疏水性增强、蛋白分子链变短、粒径和 ζ -电位绝对值降低,进而导致乳化活性降低。超声波是通过空化作用改变蛋白体系的乳化和流变性,而高压处理则是通过改变蛋白

体系的形貌和尺寸来实现,最典型的即是高压处理改变蛋白纳米颗粒的尺寸来提升其递送物质的能力(图2b)。这种转化也会存在弊端,当压力达到体系承受极限的时候,或许会对蛋白质原本的结构造成不可逆转的大规模改变,这种改变将会使蛋白质一些原有性质发生转变,甚至会导致一部分活性的丧失。Zou等^[51]研究了HPH对贻贝水溶性蛋白质(MWP)理化性质和功能特性的影响,结果表明,HPH处理使MWP的初始结构展开或破坏,暴露出自由巯基和内部的疏水基。随着均化压力的增加,MWP颗粒的聚集逐渐减少。此外,蛋白质在水溶液中的溶解度和分散稳定性增加。发泡和乳化性能也得到了改善。事实证明,高压均质技术无论是对于植物类蛋白还是动物类蛋白的改性均有作用。尽管这个作用是积极与消极并存的,但是已经有很多研究证明,高压均质技术在蛋白改性方面仍是不可或缺的一部分。

4.2 压力场联合其它场改性蛋白对食品的抗菌性

目前关于压力场的研究已经逐渐从单压力场演变成了压力复合场,例如压力场与热力场的结合(图3b),还有高压场与静电场的结合等,这些复合场相比于单压力场拥有着更大的潜力和更广阔的应用前景。Chen等^[52]研究了超高压(300~450 MPa;5 min)或超高压协同加热(90 °C;30 min)处理下,红毛三棱鱼糜凝胶性质和肌原纤维蛋白结构的变化。结果表明,400 MPa以下的超高压可以改善凝胶性能。与对照组相比,350 MPa组的持水能力提高了27.40%。此外,在300 MPa和350 MPa高压诱导下的鱼糜凝胶的强度分别提高了38.08%和40.00%,并在进一步加热后继续提高17.86%和21.00%。在高压协同加热中,热力场导致了鱼糜进一步凝胶化。且研究进一步叙述了高压降低了肌原纤维蛋白中 α -螺旋和 β -转角含量,增加了 β -折叠和无规则卷曲。但是通过热处理之后, α -螺旋的含量进一步增加,使得结构进一步稳定。宁椿源等^[53]通过探究高压均质结合VC处理桃浊汁发现,高压均质结合VC处理不仅可显著降低桃浊汁中微生物,同时还可以抑制果汁褐变,提高总酚和黄酮等营养物质。进一步说明了复合场应用的重要性,压力场的复合在提升食品抗菌性领域的应用仍需要进一步的研究和改进。

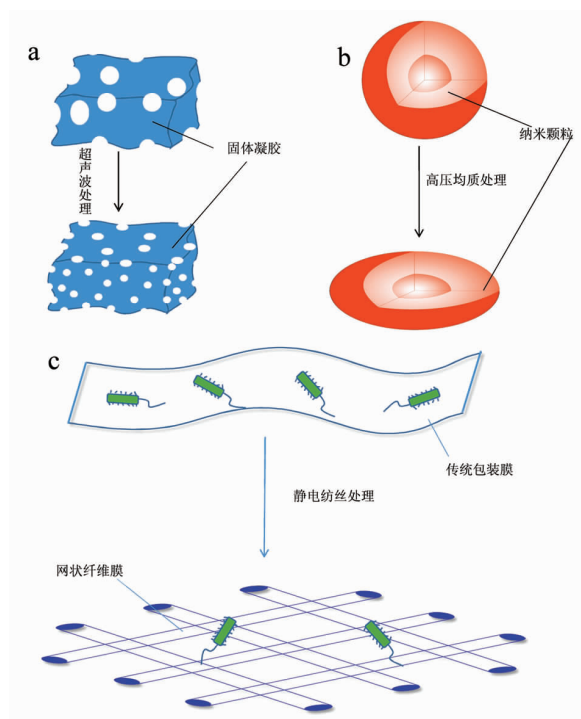


图 2 3 种经典物理场对于凝胶、纳米颗粒及生物膜的改性效果

Fig.2 Modification effects of three classical physical fields on gels, nanoparticles and biofilms

5 静电场对食品成分改性的影响

5.1 静电场对食品的改性

5.1.1 静电场技术 静电场自内可以理解为静电的相互作用；自外可以理解为对蛋白质体系施加电场，由于蛋白质分子内部存在的这种作用分为两种：即分子内电场和分子间电场，且蛋白质分子内的稳定就归因于分子内电场，而蛋白质底物、蛋白质-蛋白质(或蛋白质-DNA 结合等远程识别归因于分子间电场^[54]。Huang 等^[55]研究了在自然蛋黄 pH(6.2)和自然全蛋 pH(7.5)条件下， κ -卡拉胶(κ -C)对热诱导蛋黄凝胶化的影响，结果表明蛋白质和 κ -C 之间形成了静电相互作用，且 κ -C 通过静电相互作用增强了蛋黄特性。张浩等^[56]通过静电纺丝制备玉米醇溶蛋白(Zein)和聚环氧乙烷(PEO)纳米纤维膜，发现相较于其余的共混体系膜，PEO 含量多的纳米纤维膜具有拉伸强度更高的特点且含 PEO 的纳米纤维膜的表面细胞位点多，其细胞的黏附性也更强。相比于传统工业制成的膜，通过静电纺丝制成的膜由于其纤维结构，导

致其机械性能以及抗菌性更强(图 2c)，如今纤维膜逐渐替代传统工业膜的一个原因即是如此。由于蛋白质分子具有两性解离的特点，所以可以通过外加电场调节 pH 值实现蛋白质的分离。静电场对于蛋白质的作用远不止于此，由于外加电场可以破坏蛋白质分子内部的电场，导致了分子会有电荷附着，这种电荷会进一步与菌类表面的电荷相互作用，如果是异种电荷即会出现破坏菌类细胞膜的现象，从而实现了杀菌的作用。

在蛋白改性方面，外加静电场大致可分为低压静电场和高压静电场，两种静电场在食品加工和生产方面均存在不同的作用。例如 Xie 等^[57]研究了通过施加低压电场(LVEF)来减少制备牛排在冷冻过程中的多汁性和质地特性损失，结果表明了在层间距为 30 cm(LVEFF-30)时，有效地降低了牛排的压力损失和解冻损失。Qian 等^[58]研究了低压静电场解冻(LVEFT)对肌原纤维蛋白理化性质变化及解冻牛肉品质的影响，结果表明，应用 LVEFT 后，解冻过程缩短了 42%且变性的肌原纤维蛋白(冷冻诱导的)会随着解冻时间的延长而复性。Jia 等^[59]研究了高压静电(HVEF)解冻(电压范围： $-25\sim 0$ kV)对肌原纤维蛋白氧化和变性的影响。结果表明，根据总巯基和羰基含量，HVEF 解冻期间不会发生进一步的蛋白质氧化，且在 -10 kV 条件对肌原纤维蛋白的结构没有影响。上述例子已经说明静电场在一定程度上改变了蛋白的性质，但是和超声及高压不同的是，静电场改性之后蛋白是可以复原的，这主要是因为有些电场的强度产生的应力不足以使蛋白质永久变性^[60]，所以出现改性复原的现象。

5.1.2 静电场对食品方向的改性 静电场目前在食品方面主要是冷冻、解冻以及抗菌保鲜等。无论是低压静电场还是高压静电场，在冷冻、解冻方面，均展现出了一定程度的优点，Kao 等^[61]研究了高压静电场(HVEF)非热处理技术延长鲜切西兰花在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的货架期以及质量参数，结果表明，HVEF 可以将鲜切西兰花的保质期延长至 40 d，并有可能提高鲜切西兰花的贮藏质量。胡斐斐^[62]在研究低压静电场结合高湿解冻下冷冻肉解冻速率、色泽、持水力、质构和微观结构等变化时发现，低压静电场辅助冻藏可有效延缓猪肉在贮藏期间

的品质劣变,且短期内贮藏(28 d),静电场辅助-12℃冻藏肉品品质可达到-18℃常规冻藏的效果。由此可推断无论在高压还是低压静电场内,对于食品的保鲜都起到了一定程度的作用,而这正是静电场在食品加工和运输应用的基础。除此之外,猜测静电场对肉类食品的冷冻和解冻时均有一定的保护作用,这个作用主要是作用于持水力,蛋白质聚集状态。因为在肉类在冷冻和解冻时,其质量会受到很多因素影响,如冷冻前准备、冷冻速度和时间,尤其是冻结和解冻方法^[63]。传统的解冻方法是将冻肉投放在水中或在将其暴露在空气中解冻,然而这种解冻方法会在一定程度上导致肉类食品中的营养物质流失,使得肉类品质下降,进而影响其感官特性。当使用低压静电场辅助冻结或解冻时,会使得蛋白质的聚集态发生改变,这其中自然也会涉及蛋白质的改性,通过破坏了蛋白质原有的静电作用,从而实现持水能力以及品质的改变。

5.1.3 静电场对蛋白的改性 静电场对于蛋白质的改性主要涉及到蛋白质的氧化,具体表现为羰基形成,巯基还原以及蛋白质交联的形成^[64]。Liu等^[65]研究了蛋白质氧化对冷藏鳙鱼鱼片保水性的影响,结果表明:WHC的降低伴随着肌纤维的结构变化和蛋白质的氧化,而蛋白质的氧化会破坏了蛋白质的结构和极性。这主要是因为肌肉中有一部分的水是依靠蛋白质静电引力存在的,当蛋白质的结构和极性发生改变后,对水的束缚力将会下降,进而导致持水能力的下降。而这种对于蛋白质结构的破坏原理与超声波和高压均质一致的是,都是打开了蛋白质的内部结构,使得内部结合位点暴露。而关于静电场对蛋白改性的研究,比较热门的是抗菌方面,因为静电场杀菌能力较为显著,对于电场破坏细胞膜的机理出现了3种理论:Vanga等^[66]在其综述内表明了将电场应用于各种食品等生物材料会导致病原体细胞膜上的电荷积聚,从而破坏细胞壁的正常功能。Tsong^[67]也提出了电穿孔理论,其认为施加电场会引起电应力和热应力,导致脂质构象变形,从而产生新的疏水孔。施加电场会导致这些敏感蛋白质变性,导致功能特性丧失^[68]。总而言之,相比于超声波以及高压均质来说,静电场对于蛋白体系的改性程度较大。由

于其不稳定的原因,故目前仍处于试验测试阶段。

5.2 静电场改变食品的抗菌性

当前,食品的安全性问题已经成为了食品的首要问题,主要是因为食源性疾病的泛滥,而造成这些食源性疾病生成的首要原因就是食品中致病菌的产生和繁殖,例如大肠杆菌,金黄色葡萄球菌以及大肠埃希菌等。如何对这些致病菌加以控制乃至清除一直是研究人员所专注的问题。传统的灭菌方式经常采用高压或热灭菌,但是这些方法大多只适用于工业上的大规模灭菌,对于食品体系来说,传统方法处理经常会造成营养价值的损失和感官质量的降低^[69]。静电场杀菌技术在最近几年来受到广泛关注,越来越普遍。脉冲电场(PEF)是迄今为止研究最成熟的方法,并显示出强大的抗菌效果^[70]。Takanori等^[71]揭示了以碳材料为电极的PEF对大肠杆菌有较强的灭活作用(图3c)。Xue等^[72]制备了静电纺丝多孔聚酰亚胺纤维涂层电极,可用于催化甲醛氧化。相较于传统电极,这种电极具有成本低、稳定性好、线性范围宽、检出限低的特点,若是应用于蛋白质改性领域,作为脉冲电场的电极或许会有广阔的应用。同时,Yang等^[73]发现当低压静电场为3 V/cm时芽孢杆菌生长受到抑制,且低电压静电场并没有破坏形貌。以上灭菌均说明了电场能够实现不同程度的抗菌作用。这与Lukas^[74]的研究结果一致。Qi等^[75]研究了高压静电场(HVEF)、交变电场(HVAEF)和点刺静电场(HVPEF)3种电场对金黄色葡萄球菌的抑制作用,结果表明:金黄色葡萄球菌对HVPEF的敏感性高于HVEF和HVAEF,尤其是在固体培养基表面生长时,当电压高于10 kV时,金黄色葡萄球菌的死亡率超过99.9%。且细胞形态和细胞内物质渗漏的变化表明,HVPEF损伤细胞膜,增加膜通透性。流式细胞术双染色显示HVPEF破坏了细胞膜完整性,降低了非特异性酯酶活性。这进一步说明了电场抗菌的机理是通过破坏菌类细胞膜来实现的。

电场对于食品灭菌是一种新型手段,尤其是点刺静电场灭菌的提出,对于灭菌更加有针对性,灭菌能力更强。但是高压点刺静电场存在着耗能过高的问题,所以在工业抗菌上目前并不能广泛应用。而对于低强度电场会导致蛋白质在改性之

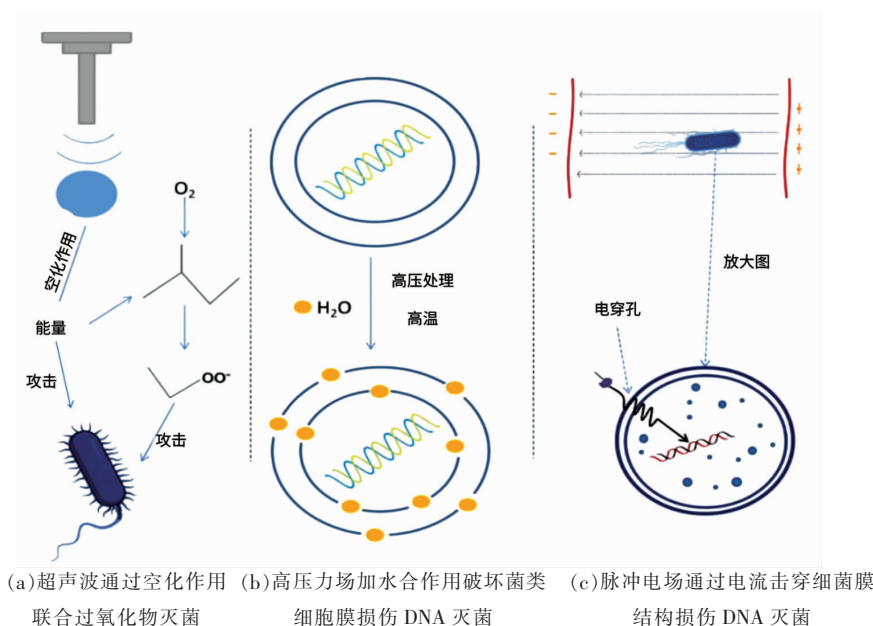


图 3 3 种经典物理场灭菌机理

Fig.3 Three classical physical field sterilization mechanisms

后出现复原的问题。但尽管如此,电场的杀菌能力是毋庸置疑的,在食品加工以及食品保藏等方面仍具有巨大的潜力等待着研究人员去探索和发掘。

6 小结与展望

本文着重介绍了超声波,高压均质以及低压、高压电场对蛋白质体系改性的影响以及在食品抗菌方向的应用。这些物理场的技术大多已经成熟,并且有一些已经广泛应用于食品加工,研发等领域。对于当前研究的新型物理场例如单离子磁体产生的场,激光诱导自旋产生的场等等,这些场仍需要大量的试验来证实其在某些领域内应用的可行性。而近些年物理场方面的研究大都以研究多场复合为主,物理场的大范围改性是一大优点,但是物理场改性的不定向性始终是有待解决的一大挑战。物理场与化学场的结合对蛋白质体系的改性会好过单物理场改性,但是条件的控制仍然是关键点,化学场的定向改性强度会强于物理场的定向改性强度,所以在一定程度上会产生“屏蔽”效应。然而化学场的使用大多涉及到污染等问题,且危害严重,所以近些年在蛋白质体系的改性方面仍是以物理场为主,化学场为辅的情况作为主导。

近些年关于新型物理场的研究大多倾向于电磁以及激光诱导,猜测主要原因在于相比于传统物理场,电磁场产生的能量更大且覆盖面更广,对于大范围改性的初衷更加有益,而激光本身即是精准的代名词,在一定程度上增强了物理场的定向改性能力。

物理场对于蛋白质体系的改性仍需要试验进行探索,无论是对于食品安全的提升亦或是对于特需食品的研发,物理场的应用已经成为了新时代的一种趋势。随着当前人们对食品的品质,安全等方面的要求不断提高,物理场在食品领域会越来越普及,而如何在物理场的作用下定向改性出人们所需求的食品,对于研究和市场都是一个重大的挑战和机遇。

参 考 文 献

- [1] JEZ J M. Revisiting protein structure, function, and evolution in the genomic era[J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2017, 142: 11-15.
- [2] ZHENG M Y, ZHAO J H, CUI C, et al. Computational chemical biology and drug design: Facilitating protein structure, function, and modulation studies[J]. *Medicinal Research Reviews*, 2018, 38

- (3): 914-950.
- [3] ZHA F C, DONG S Y, RAO J J, et al. The structural modification of pea protein concentrate with gum Arabic by controlled Maillard reaction enhances its functional properties and flavor attributes [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 92: 30-40.
- [4] 高瑾, 梁宏闪, 赵靖响, 等. 玉米醇溶蛋白-多酚相互作用及复合物制备与表征[J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 8-17.
- GAO J, LIANG H S, ZHAO J Y, et al. Interaction between zein and polyphenol and preparation and characterization of complex[J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 8-17.
- [5] GIRARD A L, AWIKA J M. Effects of edible plant polyphenols on gluten protein functionality and potential applications of polyphenol-gluten interactions [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 2164-2199.
- [6] SHI Q K, WANG X Y, TANG X D, et al. *In vitro* antioxidant and antitumor study of zein/SHA nanoparticles loaded with resveratrol[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(7): 3530-3537.
- [7] ZOU J, XU M J, TANG W, et al. Modification of structural, physicochemical and digestive properties of normal maize starch by thermal treatment[J]. *Food Chemistry*, 2020, 309(C): 125733.
- [8] FAUSTINO M, VEIGA M, SOUSA P, et al. Agro-food byproducts as a new source of natural food additives[J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1056.
- [9] BARBA F J, ZHU Z Z, KOUBAA M, et al. Green alternative methods for the extraction of antioxidant bioactive compounds from winery wastes and by-products: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 49: 96-109.
- [10] SORIA A C, VILLAMIEL M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(7): 323-331.
- [11] 邓爱华, 汤须崇, 王云, 等. 超声波对葵花籽蛋白功能特性的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(2): 90-94.
- DENG A H, TANG X C, WANG Y, et al. Effect of ultrasonic wave on functional characteristics of sunflower seed protein[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(2): 90-94.
- [12] 范金波, 麻奥, 闵爽, 等. 超声波处理对绿原酸与牛血清白蛋白结合作用影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(3): 129-138.
- FAN J B, MA A, MIN S, et al. Effect of ultrasonic treatment on the binding of chlorogenic acid to bovine serum albumin[J]. *Journal of Food Science of China*, 2022, 22(3): 129-138.
- [13] ZHAO C B, MIAO Z C, YAN J N, et al. Ultrasound-induced red bean protein-lutein interactions and their effects on physicochemical properties, antioxidant activities and digestion behaviors of complexes [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2022, 160: 2-10.
- [14] QUAN W, TAO Y D, QIE X J, et al. Effects of high-pressure homogenization, thermal processing, and milk matrix on the *in vitro* bioaccessibility of phenolic compounds in pomelo and kiwi juices[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 64: 103633.
- [15] 张艳艳, 王冰蕊, 丁江涛, 等. 静电场辅助冷冻对面筋蛋白品质及分子结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(9): 30-35.
- ZHANG Y Y, WANG B R, DING J T, et al. Effect of electrostatic field-assisted freezing on gluten quality and molecular structure[J]. *Journal of China Cereals and Oils*, 2021, 36(9): 30-35.
- [16] BERNARDI S, LUPATINI -MENEGOTTO A L, KALSCHNE D L, et al. Ultrasound: a suitable technology to improve the extraction and technological properties of vegetable food proteins [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2021, 76(1): 1-11.
- [17] FU X Z, BELWAL T, CRAVOTTO G, et al. Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 60(C): 104726.
- [18] 赵晓彤, 徐丽娜, 张宏, 等. 超声辅助提高大豆蛋白纳米复合膜包装性能及其保鲜应用[J]. *食品科学*, 2020, 41(19): 230-237.
- ZHAO X T, XU L N, ZHANG H, et al. Ultrasound-assisted improvement of packaging performance of soybean protein nano-composite film and its fresh-keeping application [J]. *Food Science*, 2020, 41(19): 230-237.
- [19] GREGERSEN S B, WIKING L, HAMMERSHØJ M, et al. Acceleration of acid gel formation by high intensity ultrasound is linked to whey protein denatu-

- ration and formation of functional milk fat globule-protein complexes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 254: 17-24.
- [20] LI S Y, ZHANG R, LEI D, et al. Impact of ultrasound, microwaves and high-pressure processing on food components and their interactions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 1-15.
- [21] CHEN J W, MU T H, ZHANG M, et al. Effect of high hydrostatic pressure on the structure, physicochemical and functional properties of protein isolates from cumin (*Cuminum cyminum*) seeds[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(3): 752-761.
- [22] ZHAO C B, YIN H H, YAN J N, et al. Structure and acid-induced gelation properties of soy protein isolate-maltodextrin glycation conjugates with ultrasonic pretreatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106278.
- [23] YU H, ZHONG Q L, LIU Y, et al. Recent advances of ultrasound-assisted Maillard reaction [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, 64: 104844.
- [24] WANG F, ZHANG Y Z, XU L, et al. An efficient ultrasound-assisted extraction method of pea protein and its effect on protein functional properties and biological activities[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 2020, 127: 109348.
- [25] 殷春燕, 咎立峰, 邢浩春, 等. 超声辅助提取对蛋白质的功能性质和结构影响的研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 246-253.
- YIN C Y, YAN L F, XING H C, et al. Research progress of the effect of ultrasonic-assisted extraction on the functional properties and structure of protein [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(1): 246-253.
- [26] XUE H, TU Y G, ZHANG G W, et al. Mechanism of ultrasound and tea polyphenol assisted ultrasound modification of egg white protein gel[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 81: 105857.
- [27] CAO X H, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 40(PA): 333-340.
- [28] SILVA F V M. Ultrasound assisted thermal inactivation of spores in foods: Pathogenic and spoilage bacteria, molds and yeasts[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 402-415.
- [29] MEHRAN B, FARHAD G, ABDUR R, et al. Biodegradability, physical, mechanical and anti-microbial attributes of starch nanocomposites containing chitosan nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 195: 49-58.
- [30] SHIMA J, MAHDI J S. Impact of metal nanoparticles on the mechanical, barrier, optical and thermal properties of biodegradable food packaging materials [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 61(16): 1-19.
- [31] ZHEN N, WANG X Y, LI X, et al. Protein-based natural antibacterial materials and their applications in food preservation[J]. *Microbial biotechnology*, 2021, 15(5): 1324-1338.
- [32] 赵然. 植物精油复合花青素可食膜的制备及其保鲜效果研究[D]. 辽宁: 渤海大学, 2021.
- ZHAO R. Preparation of edible film of plant essential oil compound anthocyanin and its fresh-keeping effect[D]. Liaoning: Bohai University, 2021.
- [33] 徐甜, 高成成, 汤晓智. 壳聚糖/植物精油可食性抗菌膜研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(18): 323-329, 335.
- XU T, GAO C C, TANG X Z. Research progress of chitosan/plant essential oil edible antibacterial film [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2018, 39(18): 323-329, 335.
- [34] ZHANG H, XI S X, HAN Y C, et al. Determining electrospun morphology from the properties of protein-polymer solutions [J]. *Soft Matter*, 2018, 14(18): 3455-3462.
- [35] SHI C, XI S X, HAN Y C, et al. Structure, rheology and electrospinning of zein and poly (ethylene oxide) in aqueous ethanol solutions [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2018, 30(2): 305-310.
- [36] 金晓春, 安琪, 王心雅, 等. 玉米醇溶蛋白/聚环氧乙烷同轴静电纺丝负载姜黄素及其释放特性[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 61-69.
- JIN X C, AN Q, WANG X Y, et al. Coaxial electrospinning of zein/polyethylene oxide loaded curcumin and its release characteristics[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(14): 61-69.
- [37] MARYAM N N, ALI S D, RAFFAELE M, et al. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food

- products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106789.
- [38] HOSSAIN B F, YEA C S, KHARIDAH M, et al. Texturized mung bean protein as a sustainable food source: Effects of extrusion on its physical, textural and protein quality[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 67: 102591.
- [39] LUO L, CHENG L R, ZHANG R J, et al. Impact of high-pressure homogenization on physico-chemical, structural, and rheological properties of quinoa protein isolates[J]. *Food Structure*, 2022, 32: 100265.
- [40] RACHEL L, ZOYA O, MAYA D P, et al. Utilization of high-pressure homogenization of potato protein isolate for the production of dairy-free yogurt-like fermented product[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 113: 106442.
- [41] KANG Z L, BAI R, LU F, et al. Effects of high pressure homogenization on the solubility, foaming, and gel properties of soy 11S globulin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124(PA): 107261.
- [42] ZHANG A Q, WANG L, SONG T R, et al. Effects of high pressure homogenization on the structural and emulsifying properties of a vegetable protein: *Cyperus esculentus* L[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2022, 153: 112542.
- [43] JESSIKA G D S A, MARCELO C, HELIA H S, et al. Modification of enzymes by use of high-pressure homogenization[J]. *Food Research International*, 2018, 109: 120–125.
- [44] WELLALA C K D, BI J F, LIU X, et al. Effect of high pressure homogenization on water-soluble pectin characteristics and bioaccessibility of carotenoids in mixed juice[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131073.
- [45] MESA J, HINESTROZA –CORDOBA L I, BARRERA C, et al. High homogenization pressures to improve food quality, functionality and sustainability[J]. *Molecules*, 2020, 25(14): 3305.
- [46] SONI G, KALE K, SHETTY S, et al. Quality by design (QbD) approach in processing polymeric nanoparticles loading anticancer drugs by high pressure homogenizer[J]. *Heliyon*, 2020, 6(4): e03846.
- [47] CHEN Q H, LI X Y, HUANG C L, et al. Development and mechanical properties of soy protein isolate-chitin nanofibers complex gel: The role of high-pressure homogenization[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, 150: 112090.
- [48] DURMUS S, EMIN M, MEHMET K. Development of buffalo milk ice-cream by high pressure-homogenisation of mix: Physicochemical, textural and microstructural characterisation[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, 150: 112013.
- [49] ZHAO S L, HUANG Y, DAVID J M, et al. Improving pea protein functionality by combining high-pressure homogenization with an ultrasound-assisted Maillard reaction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 126: 107441.
- [50] 郭增旺, 郭亚男, 李柏良, 等. 高压均质条件下大豆蛋白热聚集体结构和乳化特性研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 351–358, 374.
- GUO Z W, GUO Y N, LI B L, et al. Study on the structure and emulsification characteristics of soybean protein thermal aggregates under high pressure homogenization[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 351–358, 374.
- [51] ZOU H N, ZHAO N, SHI X J, et al. Modifying the physicochemical and functional properties of water-soluble protein from mussels by high-pressure homogenization treatment[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2020, 16(3): 20190274.
- [52] CHEN Y T, XU A Q, YANG R, et al. Myofibrillar protein structure and gel properties of trichiurus haumela surimi subjected to high pressure or high pressure synergistic heat[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(4): 589–598.
- [53] 宁椿源, 周林燕, 毕金峰, 等. 高压均质技术结合VC处理对桃浊汁微生物和品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(11): 141–149.
- NING C Y, ZHOU L Y, BI J F, et al. Effect of high-pressure homogenization combined with VC treatment on the microorganism and quality of cloudy peach juice[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(11): 141–149.
- [54] MATTHEW J B. Electrostatic effects in proteins[J]. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 1985, 14: 387–417.
- [55] HUANG M, MAO Y Z, LI H L, et al. Kappa-carrageenan enhances the gelation and structural changes of egg yolk via electrostatic interactions with yolk protein[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 129972.
- [56] 张浩, 黄洪亮, 董怡麟, 等. 同轴静电纺丝玉米醇

- 溶蛋白和聚环氧乙烷不同核壳纤维的性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(11): 116–122, 130.
- ZHANG H, HUANG H L, DONG Y L, et al. Properties of different core-shell fibers of zein and polyethylene oxide by coaxial electrospinning [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(11): 116–122, 130.
- [57] XIE Y, CHEN B, GUO J, et al. Effects of low voltage electrostatic field on the microstructural damage and protein structural changes in prepared beef steak during the freezing process [J]. Meat Science, 2021, 179: 108527.
- [58] QIAN S Y, LI X, WANG H, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine *Longissimus dorsi* muscle[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261(C): 140–149.
- [59] JIA G L, NIRASAWA S, JI X H, et al. Physicochemical changes in myofibrillar proteins extracted from pork tenderloin thawed by a high-voltage electrostatic field[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 910–916.
- [60] HAN Z, CAI M J, CHENG J H, et al. Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 1–9.
- [61] KAO N Y, TU Y F, SRIDHAR K, et al. Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf-life of fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) [J]. LWT – Food Science and Technology, 2019, 116(C): 108532.
- [62] 胡斐斐. 低压静电场辅助冻藏及解冻对猪肉品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- HU F F. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted freezing and thawing on pork quality[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [63] QIAN S Y, LI X, WANG H, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine *Longissimus dorsi* muscle[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 261: 140–149.
- [64] LUND M N, HEINONEN M, BARON C P, et al. Protein oxidation in muscle foods: a review [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2011, 55(1): 83–95.
- [65] LIU Y Y, ZHANG L T, GAO S, et al. Effect of protein oxidation in meat and exudates on the water holding capacity in bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) subjected to frozen storage [J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131079.
- [66] VANGA S K, WANG J, JAYARAM S, et al. Effects of pulsed electric fields and ultrasound processing on proteins and enzymes: A review [J]. Processes, 2021, 9(4): 722.
- [67] TSONG T Y. Electroporation of cell membranes [J]. Biophysical Journal, 1991, 60(2): 297–306.
- [68] WOUTERS P C, ALVAREZ I, RASO J. Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric field food processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2001, 12(3/4): 112–121.
- [69] WANG M S, ZENG X A, SUN D W, et al. Quantitative analysis of sublethally injured *Saccharomyces cerevisiae* cells induced by pulsed electric fields [J]. LWT–Food Science and Technology, 2015, 60(2): 672–677.
- [70] GABRIELLA M O, TONY Z J, OSVALDO H C. Modeling the inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella Typhimurium* in juices by pulsed electric fields: The role of the energy density [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 282: 110001.
- [71] TAKANORI T, MAKOTO H, REO M, et al. Engineering of pulsed electric field treatment using carbon materials as electrode and application to pasteurization of sake [J]. Journal of Electrostatics, 2020, 104: 103424.
- [72] XUE J, LI X, JIN X C, et al. Electrocatalytic oxidation of formaldehyde using electrospinning porous zein-based polyimide fibers [J]. Materials Letters, 2022, 320: 132318.
- [73] YANG G J, WANG Y, ZHENG X Y. Effect of low-voltage static electric field on growth of *Bacillus* sp [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3468(644–650): 5415–5418.
- [74] LUKAS F, LUDEK S, VLADIMIR V, et al. Comparison of the low-frequency magnetic field effects on bacteria *Escherichia coli*, *Leclercia adedecarboxylata* and *Staphylococcus aureus* [J]. Bioelectrochemistry, 2003, 63(1): 337–341.
- [75] QI M Y, ZHAO R Q, LIU Q Y, et al. Antibacterial activity and mechanism of high voltage electro-

static field (HVEF) against *Staphylococcus aureus* in medium plates and food systems[J]. Food Control, 2021, 120: 107566.

The Physical Field-assisted Modified Protein Complex System and Its Application in Food Antibacteria

Qian Sheng, Lan Tiantong, Song Tingyu, Zhang Hao*, Liu Jingsheng

(College of Food Science and Engineering, National Engineering Research Center of Wheat and Corn Further Processing, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract Food has always been a resource on which people live, and protein is an important part of food. Protein not only provides people with daily energy, but also provides a habitat for some fungi in food. If not controlled, it will not only lead to food corruption and deterioration, but also pose a great threat to human food safety. In traditional methods, people usually kill the surface of food or add bacteriostatic agents in the process of food processing to inhibit the growth of bacteria. However, these methods also have obvious drawbacks, that is, the chemicals in the disinfectant will remain on the food surface and be ingested by people, which does not meet the high standard requirements of food safety. With the gradual maturity of the research on the direction of protein modification, many methods of protein modification have also entered the public's attention. The physical field modification of protein is one of many methods, which is undoubtedly more novel than some traditional methods and safer than traditional disinfection methods. Some recent studies have also confirmed that the antibacterial activity of proteins modified by physical fields is indeed improved. Therefore, while combing the related research on improving food antibacterial property by physical field modified protein, this paper is also intended to provide new ideas and innovations for people's research in this area.

Keywords food; protein; physical field; modification; antibacterial property