

低温等离子技术及其对食品品质与微生物的影响

Cold plasma technology and its effect on the food quality and microorganism

杨新文¹牛文俊¹成军虎²王满生³YANG Xin-wen¹ NIU Wen-jun¹ CHENG Jun-hu² WANG Man-sheng³

(1. 安徽中储粮粮油质监中心, 安徽 合肥 230041; 2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东 广州 510640; 3. 中国农业科学院麻类研究所, 湖南 长沙 410205)

(1. Grain and Oil Quality Supervision Center of Anhui-CGR, Hefei, Anhui 230041, China; 2. South China University of Technology College of Food Science and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 3. Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410205, China)

摘要:阐述了低温等离子体技术的发展现状、放电方式、诊断及活性成分表征,综述了低温等离子体技术处理对食品主要品质指标淀粉和蛋白质结构的变化规律以及对食品中微生物灭活的研究进展,为低温等离子技术调控食品品质提供重要理论参考和新的技术手段,为该技术的工程化应用提供理论支撑。

关键词:低温等离子体技术;蛋白质;淀粉;微生物灭活

Abstract: This paper briefly described the development status, discharge mode, diagnosis and characterization of active components of cold plasma technology, and discussed the changes of macromolecules such as starch and protein structure in food systems and microbes inactivation in foods, which provides an important theoretical reference and new technical means for the regulation of food quality by cold plasma technology, and also provides theoretical support for the engineering application of this technology.

Keywords: low temperature plasma technology; protein; starch; microbial inactivation

等离子体被认为是固体、液体和气体以外,物质的第4种状态。等离子体是由原子或原子团失去电子后电离产生的由带电离子及中性粒子组成的离子化气体状物

质。从本质上讲,等离子体是一个高能系统,它包含分子、原子、离子、电子和自由基等多种活性物质,其中会发生多种化学反应和紫外线(UV)辐射^[1]。与样品相互作用时,除了碰撞、蚀刻、紫外辐射等物理效应外,样品与活性物质之间的化学相互作用使等离子体成为一种独特的物质形式。等离子体分为热等离子体和非热等离子体,非热等离子体中又包括平衡(100~150℃)和非平衡(<60℃)等离子体^[1]。在非平衡体系中冷却离子和中性分子比通过转移电子的能量更有效,且气体能保持较低的温度。因此,非平衡等离子体也称为低温等离子体。低温等离子体技术的处理通常包括两个方面:①在等离子体产生的过程中,高频放电产生的瞬时高能物质分子的化学键断裂,使之分解为小分子;②等离子体激发产生后包含了大量的高能电子、激发态粒子和众多具有强氧化作用的活性氧(如OH·、HO₂·、O₃等)与活性氮(如NO·、NO₂·、NO₃·等)^[2]。在电场作用下,这些高能活性粒子具有易与物质分子反应的高氧化电位,通过反应结合,使得处理分子的化学键断裂,分解成为单质原子或单原子气体分子^[2]。这些活性成分可以与食品体系中的有机大分子如淀粉和蛋白质以及食源性微生物的细胞膜成分及DNA作用,起到一定的改性、修饰和灭活的效应。文章重点综述了低温等离子体作为一种新型的非热加工物理场对食品中的淀粉结构的交联与解聚、蛋白质的高级结构的修饰以及对微生物的快速灭活方面的应用,为该技术的工程化应用提供理论支撑。

1 低温等离子体技术

1.1 等离子体放电

目前,低温等离子体的产生主要是通过气体放电,在

基金项目:广东省级科技创新战略专项资金(编号:2018D1002);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号:1610242019002)

作者简介:杨新文,男,安徽中储粮粮油质监中心助理工程师,学士。

通信作者:王满生(1987—),男,中国农业科学院麻类研究所助理研究员,博士。E-mail: wms198704@163.com

收稿日期:2019-06-30

食品领域,较为常见的气体放电方式为介质阻挡放电和电晕放电。在放电过程中,高密度的电子通过气态介质在电场中被加速,使电子和气体中的原子及分子发生初次大量碰撞,这些碰撞会改变电子的方向和能量,但是由于质量差异,一些质量较大的粒子在碰撞过程中几乎无动量传递,能保持接近外界环境的温度^[3]。对于在大气压下空气等离子,氧气和氮气经过电离、离解等反应生成基态或激发态的粒子等,它们具有比单分子之间碰撞更低的活化能,与电子发生二次碰撞,进一步生成大量的活性氧、活性氮物质。同时,伴随着电子跃迁,会产生大量的紫外线,在紫外线和这些活性成分的作用下,对微生物进行灭活。

1.2 等离子体诊断

在等离子体的产生过程中,有电子、离子、自由基和光子等多种物质参与,为了更好地理解和控制这一过程,人们使用不同的方法来检测和诊断等离子体。目前,诊断技术主要分为电学和光学两种方式,一般实时进行。电学诊断技术常用的有朗缪尔探针、等效电路模型以及干涉测量法。朗缪尔探针法是将电极探针放入产生的等离子体中,通过描绘电流电压特性曲线间接诊断等离子体的浓度^[4]。一般来说,这种方法要求探头的直径短于电子的平均自由路径,德拜长度满足拉普拉斯极限定理。否则,外层护套结构和内部碰撞的干扰会影响电子密度、空间电位等参数的检测。等效电路模型适用于产生大气压等离子体的高压电源,电压的时间特性由高压探头测量,并用数字示波器记录电压的时间变化。对于高于 500 V 的电压,通常会使用具有某些特性的分压器。干涉测量方法主要表征和测量等离子体的折射率,通过计算沿等离子体源的激光路径长度与折射率的关系从而诊断出等离子体的密度^[5]。等离子体能激发不同波长的电磁波、电场以及磁场。通过光学测量能够有效地诊断等离子体的温度、密度和化学组成。测量仪器主要由 4 部分组成:等离子体产生装置作为光源,透镜作为光导向器,衍射光栅作为光谱仪,感光片作为检测器。在红外区域,通过傅立叶变换光谱法能观察到分子旋转与振动之间的转变,具有高光谱分辨率和高信噪比。干涉仪通过移动光学路径创建时域干涉图,再将干涉图转换为频域频谱。图 1 展示了以 Ar 惰性气体为工作气体的射频型低温等离子体的原子发射光谱图。

1.3 等离子体活性成分

低温等离子体激发过程中会产生大量的活性成分(RS)如活性氧(ROS)和活性氮(RNS),通常使用光学发射光谱(OES)、光学吸收光谱(OAS)和质谱来鉴定和分析。Pankaj 等^[6]在低温等离子体中检测各种原子和分子氧离子,研究表明,除了氧物质,原子 He 和羟基自由基(309 nm)以及激发的氮分子(300~400 nm)之外,还在 DBD He-等离子体中进行了测试。Park 等^[7]比较了使用

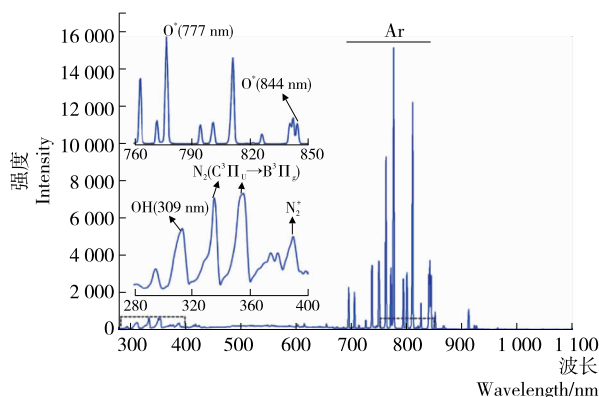


图 1 Ar 惰性气体的射频型低温等离子体的原子发射光谱图

Figure 1 OES presentation of RF cold plasma of Ar working gas

Ar、Ar-O₂混合物和 Ar-N₂混合物从冷等离子体产生的 RS,并且显示在接地电极附近添加 O₂或 N₂时,Ar 强度无显著变化,然而,在离地电极 2 mm 处减小,未检测到 Ar 或 Ar-O₂等离子体的 NO(283 nm)发射,意味着距离接地电极的距离和使用不同的进气作用生产 RS 的重要作用,随着距离的增加,RS 强度降低。相应地,RS 与溶液或固体培养基之间存在相互作用趋势。Attri 等^[8]揭示了这些活性离子和自由基与水反应并在液相中产生了多种生物 RS。这些包括长寿命物种如 NO₃⁻、O₃和 H₂O₂,以及短寿命物种如 ·OH、O₂⁻·和 NO_x,具体如表 1 所示。通常,短寿命物种由于其高活性而不能直接监测,而分光光度法和 X 射线分析可用于测试液相或固相中的反应产物^[8]。

2 低温等离子体处理对食品品质的影响

2.1 对淀粉结构的影响

食品中淀粉结构的修改和改性与淀粉的有效利用至为重要。Bunara 等^[9]通过低温等离子体处理玉米淀粉,发现经过低温等离子处理的玉米淀粉的水结合能力有所增加。形成的主要原因是等离子体处理过后的淀粉样品,其部分直链淀粉与支链淀粉被降解为麦芽糖和葡萄糖等小分子糖,而这些糖含量的增加,会提高淀粉整体的亲水性能。Pal 等^[10]研究认为,稻米经过等离子体处理后,米粒中直链淀粉与支链淀粉中链的支化程度增加,处理后淀粉的脱水收缩性也发生了改变。在被处理前的冷藏期间,谷物淀粉分子主要由淀粉链之间的分子缔合引起重组,导致脱水收缩,而经过低温等离子体技术处理后,谷物中淀粉分子间的糖苷键在等离子体的作用下裂解而解聚,进而发生脱水收缩,如图 2 所示。

2.2 对蛋白质结构的影响

等离子体中产生的活性成分可以较为显著地影响肉的颜色。其中,NO和CO都有可能与肌红蛋白血红素发

表 1 等离子体—液体各相活性物质

Table 1 Plasma-liquid active substances in each phase

相态	成分
等离子体	阳性基团: N^+ , N_2^+ , N_3^+ , N_4^+ , N_2O^+ , NO_2^+ , H^+ , H_2^+ , H_3^+ , O_2^+ , O_4^+ , OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+
	阴性基团: e^- , O^- , O_2^- , O_3^- , O_4^- , NO^- , NO_2^- , NO_3^- , N_2O^- , H^- , OH^-
	中性基团: $\text{N}(\text{}^2\text{D})$, $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma)$, $\text{N}_2(\text{B}^3\Pi)$, H , N , H_2 , N_2 , H_2O , $\text{O}(\text{}^1\text{D})$, O , $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$, O_3 , OH , HO_2 , H_2O_2 , O_2 , NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 , HNO_2 , HNO_3 , N_2O , HNO
气体	NO , N_2O , NO_2 , NO_3 , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 , HNO , HNO_2 , HNO_3 , N , N_2 , O_2 , O , $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$, O_3 , OH , HO_2 , H_2O_2 , H_2 , H_2O
液体	O_{aq} , $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)_{\text{aq}}$, $\text{O}_{3\text{aq}}$, OH_{aq} , $\text{HO}_{2\text{aq}}$, $\text{HO}_{3\text{aq}}$, $\text{H}_2\text{O}_{2\text{aq}}$, $\text{N}_{2\text{aq}}$, $\text{O}_{2\text{aq}}$, H_{aq} , $\text{H}_{2\text{aq}}$, NO_{aq} , $\text{NO}_{2\text{aq}}$, $\text{NO}_{3\text{aq}}$, $\text{N}_2\text{O}_{3\text{aq}}$, $\text{N}_2\text{O}_{4\text{aq}}$, $\text{N}_2\text{O}_{5\text{aq}}$, $\text{HNO}_{2\text{aq}}$, $\text{HNO}_{3\text{aq}}$, $\text{N}_2\text{O}_{\text{aq}}$, HNO_{aq} , $\text{H}_2\text{O}_{\text{aq}}$, H_{aq}^+ , $\text{HO}_{2\text{aq}}^-$, OH_{aq}^- , O_{aq}^- , $\text{O}_{2\text{aq}}^-$, $\text{O}_{3\text{aq}}^-$, $\text{NO}_{2\text{aq}}^-$, $\text{NO}_{3\text{aq}}^-$, $\text{O}_2\text{NOOH}_{\text{aq}}$, $\text{O}_2\text{NCOO}_{\text{aq}}^-$, $\text{ONCOO}_{\text{aq}}^-$, $\text{ONCOOH}_{\text{aq}}$

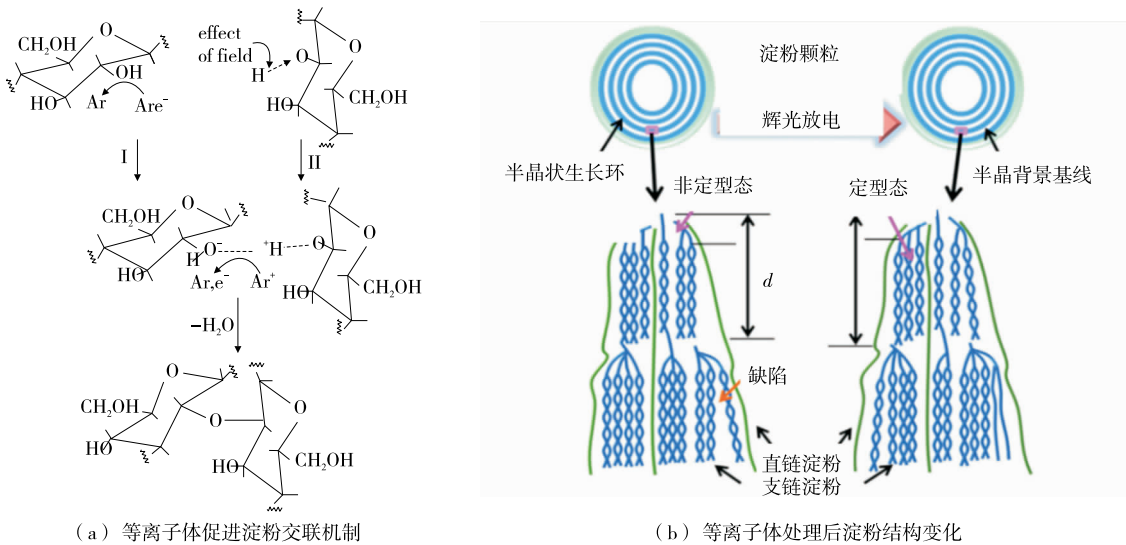


图 2 等离子体处理对淀粉结构的影响

Figure 2 The effect of cold plasma treatment on the starch structure

生配位结合,使肌红蛋白显示出鲜艳的粉红色。同时,由于等离子体产生的氮氧化物会溶于肉表面的水分中,生成亚硝酸盐和硝酸盐,导致 pH 下降的同时也有可能和肌红蛋白发生相互作用,这也是研究者认为等离子体能够作为护色手段的原因。除了与肌红蛋白的血红素配位结合,肌红蛋白还可能与 NO 的非血红素结合,即与卟啉环外的氨基酸结合,生成 N-亚硝化肌红蛋白,从而存在一定的健康风险。Yong 等^[11]发现,将溶于磷酸盐缓冲液中的肌红蛋白暴露于常压等离子体(APP)20 min 后, a^* 值下降, b^* 值上升($P<0.05$)。APP 处理后,肌红蛋白溶液中产生亚硝酸盐,为高铁肌红蛋白的亚硝化(绿色)提供了一个积极的环境。然而,在肌红蛋白溶液中添加 0.5% 二硫代钠(一种强还原剂)导致了脱氧肌红蛋白的形成,经 APP 处理后,脱氧肌红蛋白被转化为亚硝基肌红蛋白,呈现出理想的红色。因此,APP 诱导的肌红蛋白溶液中的绿色与亚硝化的高铁肌红蛋白的形成有关。Wang

等^[12]发现,将安乐死的罗非鱼暴露于 NO 气体中,暴露时间越长,肌红蛋白的血红素与 NO 结合越多。Wang 等^[13]还尝试将 NO 溶于水来处理罗非鱼肉,发现罗非鱼的颜色稳定性显著提高,货架期延长。同理, Mantilla 等^[14]采用 CO 处理罗非鱼肉,鱼肉的 a^* 值上升且稳定性增加。也有研究^[15]认为,气调包装中加入 CO 能保持牛肉的鲜红色泽。这些研究均表明,等离子体与肌红蛋白的配位结合是很可能发生的。Surowsky 等^[16]通过采用低温等离子体技术处理新鲜食品中的酶,发现对蛋白质结构稳定起重要作用的二级结构受到了明显的破坏损失。放电产生的等离子体如 OH^- 等可以参与到对蛋白质肽链的切割以及可以氧化氨基酸侧链并形成蛋白质—蛋白质交联,使蛋白质原有的活性受到显著影响。而 Deng 等^[17]也通过介质阻挡放电等离子体对蛋白质进行处理,证实被处理的蛋白质被降解为了小分子物质,蛋白质的结构受损较为显著。Ekezie 等^[18]探讨了以干燥空气

为载气的 RF 等离子体活性物质产生的氧化效应对肌原纤维蛋白(MP)结构的修饰以及对其理化特性的影响。采用分光光度法、ANS 荧光探针法探究了 CP 处理对 MP 的理化特性的影响,结果表明,与对照组相比,MP 的溶解性下降,且在 10 min 处理后,达到最低值($54.8 \pm 6.76\%$);同时浊度增加,起泡能力基本不发生变化。初步揭示了 CP 处理可以诱导 MP 分子构象的改变,为蛋白质等生物大分子的修饰提供了一定的参考;圆二色谱分析结果表明,随着处理时间的增加, α -螺旋不断下降,经过 10 min 处理后, α -螺旋结构基本消失,揭示了等离子体中的活性成分对蛋白质的二级结构产生了破坏作用;ANS 荧光探针和荧光发射光谱法分析结果表明,随着处理时间的延长,MP 分子表面的疏水性逐渐增加,经过 10 min 处理后,表面疏水值从(465.7 ± 9.33)增加到(846.6 ± 10.2)。同时,MP 蛋白的最大荧光吸收波长发生了轻微的红移。紫外吸收光谱显示 MP 分子在 280 nm 处的吸收呈现逐渐增加的趋势,初步揭示了等离子体中的活性氧成分如 OH^- 、 H_2O^+ 等对氨基酸残基以及巯基的氧化作用,以及诱导 MP 蛋白分子展开,导致疏水氨基酸暴露,从而引起 MP 蛋白分子构象的改变。图 3 揭示了低温等离子体处理对蛋白质高级结构的影响过程。

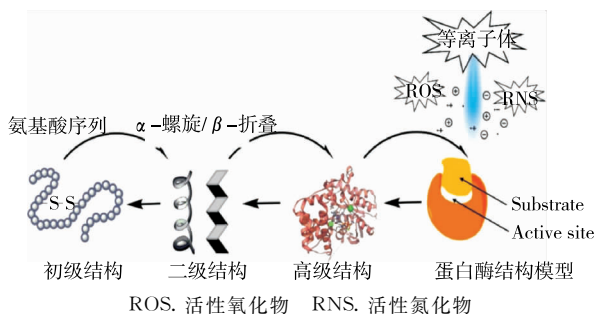


图 3 等离子体处理对蛋白质结构的影响

Figure 3 The effects of cold plasma treatment on enzyme conformation

2.3 低温等离子体处理对食品中微生物的影响

近年来,冷等离子体在食品工业中的应用显示出独特的优势,可用于灭活食品表面的沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、巴西曲霉、大肠杆菌、单核增生李斯特菌等微生物^[19],酵母^[20],枯草芽孢杆菌内生孢子^[21]和枯草芽孢杆菌^[22],黄曲霉^[23]和曲霉寄生黄曲霉孢子^[24-27]。包装后的肉经等离子体处理也能保证肉的微生物下降超过 2 个对数级,同时包装未被损坏。并且,等离子体处理在有效灭菌的同时,不会降低肉的质量,包括质地等感官质量和脂肪氧化、蛋白氧化等理化特性^[28]。Kuzminova 等^[29]的试验结果表明,随着低温等离子体处理的进行,被处理过的枯草芽孢杆菌孢子的外层组织遭到明显破坏,孢子的尺寸也明显减小,与孢子的原始尺寸相比,孢子几乎被完

全侵蚀。低温等离子体处理后微生物的细胞结构受到破坏,膜功能如控制物质进出受到显著影响,进而表现为微生物及孢子被灭活效果明显。芽孢内 DNA 携带着与芽孢内新陈代谢相关的信息,一旦相关的 DNA 受损,芽孢就很有可能死亡。目前研究发现,低温等离子体造成芽孢内的 DNA 损伤,且主要与激发气体产生的紫外线有关。Hertwig 等^[21]使用 3 组气体(Ar , $\text{Ar} + 0.135\% \text{O}_2$, $\text{Ar} + 0.135\% \text{O}_2 + 0.2\% \text{N}_2$)对枯草芽孢杆菌进行灭活,并对灭活过程中芽孢灭活率和 DNA 损伤进行动力学分析,不同气体条件下 DNA 损伤的动力学模型不同。对突变体芽孢(缺乏 α/β 型 DNA 酸可溶蛋白,缺乏核酸切除修复路径)进行低温等离子体处理的试验中发现,突变体对于在低温等离子体处理下的环境敏感性增加。Ma 等^[30-31]用大气压等离子体射流活化的等离子体活化水(PAW)处理接种过金黄色葡萄球菌的草莓,贮藏 4 d 后使草莓表面的金黄色葡萄球菌减少了 $2 \lg \text{CFU/g}$,并且对真菌生长也有一定的抑制作用。

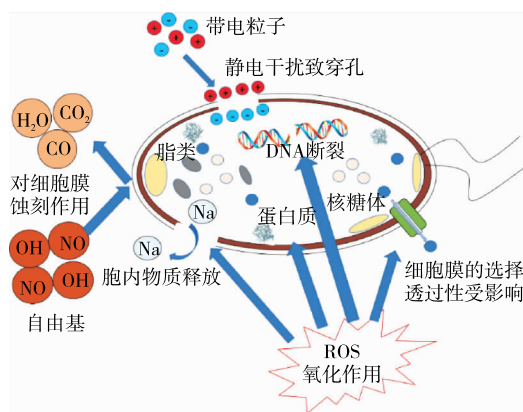


图 4 低温等离子体处理对微生物灭活机制

Figure 4 Inactivation mechanism of microorganisms by cold plasma treatment

3 结束语

低温等离子体激发过程中会产生大量的 ROS 和 RNS 等活性物质,可以与食品体系中的有机大分子如淀粉和蛋白质发生化学变化,可以进行化学修饰、改性与功能性优化。同时,这些活性成分可以与食品微生物的细胞膜成分及遗传物质 DNA 相互作用,最终达到灭活的效果。文章主要探讨了部分国内外学者使用低温等离子体处理食品分子结构变化的研究成果,为低温等离子体技术调控食品品质提供重要理论参考和新的技术手段。同时,在关于低温等离子体灭活芽孢类微生物的研究上,灭活效果明显,处理时间短,效率高,在未来应用上低温等离子体技术将会有更广阔的发展空间,为该技术的工程化应用提供理论支撑。

参考文献

- [1] ZOU Ji-jun, LIU Chang-jun, ELIASSON B. Modification of starch by glow discharge plasma [J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 55(1): 23-26.
- [2] LEE T, PULIGUNDLA P, MOK C. Degradation of benzo[a]pyrene on glass slides and in food samples by low-pressure cold plasma[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 624-628.
- [3] BIE Ping-ping, LI Xiao-xi, XIE Feng-wei, et al. Supramolecular structure and thermal behavior of cassava starch treated by oxygen and helium glow-plasmas[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34: 336-343.
- [4] CONNOR M, FLYNN P B, FAIRLEY D J, et al. Evolutionary clade affects resistance of clostridium difficile spores to cold atmospheric plasma[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41 814-41 819.
- [5] LOS A, ZIUZINA D, BOEHM D, et al. The potential of atmospheric air cold plasma for control of bacterial contaminants relevant to cereal grain production[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 36-45.
- [6] PANKAJ A, H A C E, MARR A C. Influence of reactive oxygen species on the enzyme stability and activity in the presence of ionic liquids[J]. PLoS ONE, 2013, 8(9): e75096.
- [7] ATTRI P, VENKATESU P, KUMAR A, et al. A protic ionic liquid attenuates the deleterious actions of urea on α -chymotrypsin[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2011, 13(38): 17 023-17 026.
- [8] ATTRI P, VENKATESU P, KAUSHIK N, et al. Effects of atmospheric-pressure non-thermal plasma jets on enzyme solutions[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2012, 60(6): 959-964.
- [9] BANURA S, THIRUMDAS R, KAUR A, et al. Modification of starch using low pressure radio frequency air plasma[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 719-724.
- [10] PAL P, KAUR P, SINGH N, et al. Effect of nonthermal plasma on physico-chemical, amino acid composition, pasting and protein characteristics of short and long grain rice flour[J]. Food Research International, 2016, 81: 50-57.
- [11] YONG H I, HAN M, KIM H J, et al. Mechanism underlying green discolouration of myoglobin induced by atmospheric pressure plasma[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9, 790-795.
- [12] WANG Zi-chao, YAN Yu-zhen, NISAR T, et al. Influence of postmortem treatment with nitric oxide on the muscle color and color stability of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets[J]. Nitric Oxide, 2018, 76: 122-128.
- [13] WANG Zi-chao, YAN Yu-zhen, SU Ping, et al. Treatments of tilapia (*Oreochromis niloticus*) using nitric oxide for quality improvement: Establishing a potential method for large-scale processing of farmed fish[J]. Nitric Oxide, 2018, 77: 19-25.
- [14] MANTILLA D, KRISTINSSON H G, BALABAN M O, et al. Carbon monoxide treatments to impart and retain muscle color in tilapia fillets[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(5): C390-C399.
- [15] HUNT M C, MANCINI R A, HACHMEISTER K A, et al. Carbon monoxide in modified atmosphere packaging affects color, shelf life, and microorganisms of beef steaks and ground beef[J]. Journal of Food Science, 2010, 69(1): FCT45-FCT52.
- [16] SUROWSKY B, FISCHER A, SCHLUETER O, et al. Cold plasma effects on enzyme activity in a model food system [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 19: 146-152.
- [17] DENG Xu-tao, SHI Jin-ji, MICHAEL G Kong. Protein destruction by a helium atmospheric pressure glow discharge: Capability and mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(7): 2-9.
- [18] EKEZIE F G C, CHENG Jun-hu, SUN Da-wen. Effects of atmospheric pressure plasma jet on the conformation and physicochemical properties of myofibrillar proteins from king prawn (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Food Chemistry, 2019, 276: 147-156.
- [19] FIEBRANDT M, HILLEBRAND B, LACKMANN J W, et al. Inactivation of *B. subtilis* spores by low pressure plasma-influence of optical filters and photon/particle fluxes on the inactivation efficiency[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2018, 51(4): 55-61.
- [20] GUO Jian, HUANG Kang, WANG Xiao, et al. Inactivation of yeast on grapes by plasma-activated water and its effects on quality attributes [J]. Journal of Food Protection, 2017, 80(2): 225-230.
- [21] HERTWIG C, STEINS V, REINEKE K, et al. Impact of surface structure and feed gas composition on *Bacillus subtilis* endospore inactivation during direct plasma treatment[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 774-779.
- [22] SCHNABEL U, NIQUET R, KROHMANN U, et al. Decontamination of microbiologically contaminated specimen by direct and indirect plasma treatment [J]. Plasma Processes and Polymers, 2012, 9(6): 569-575.
- [23] DASAN B G, BOYACI I H, MUTLU M. Nonthermal plasma treatment of *Aspergillus spp.* spores on hazelnuts in an atmospheric pressure fluidized bed plasma system: Impact of process parameters and surveillance of the residual viability of spores[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 196: 139-149.

(下转第 215 页)

- (Pt 1): 582-590.
- [31] 李清, 侯丽雅, 朱丽, 等. 微流体数字化喷射制备细胞微胶囊及表征[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2014, 38(1): 89-93.
- [32] 张玉冬, 雷虹, 李元敬, 等. 流体震动技术制备海藻酸钙微胶囊与性能研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2016, 7(4): 59-67.
- [33] LIAKOS I, RIZZELLO L, SCURR D J, et al. All-natural composite wound dressing films of essential oils encapsulated in sodium alginate with antimicrobial properties[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2014, 463(2): 137-145.
- [34] 林贝贝. 海藻酸钙/聚丙烯酰胺凝胶膜的制备及在控制释放和分子印迹中的应用[D]. 天津: 天津工业大学, 2015: 8-9.
- [35] RAMOS O L, PEREIRA R N, MARTINS A, et al. Design of whey protein nanostructures for incorporation and release of nutraceutical compounds in food[J]. C R C Critical Reviews in Food Technology, 2015, 57(7): 1 377-1 393.
- [36] KARASEV D A, VESELOVSKY A V, LAGUNIN A A, et al. Determination of amino acid residues responsible for specific interaction of protein kinases with small molecule inhibitors[J]. Molecular Biology, 2018, 52(3): 478-487.
- [37] MARIA J M, LARAVILLOSLADA F, MARIA A R, et al. Microencapsulation of bacteria: A review of different technologies and their impact on the probiotic effects[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 27: 15-25.
- [38] LIU Yuan, SUN Ye, SUN Li-fan, et al. In vitro, and in vivo, study of sodium polyacrylate grafted alginate as microcapsule matrix for live probiotic delivery[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 24: 429-437.
- [39] HUQ T, FRASCHINI C, KHAN A, et al. Alginate based nanocomposite for microencapsulation of probiotic: Effect of cellulose nanocrystal (CNC) and lecithin [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 168: 61.
- [40] LAELORSPOEN N, WONGSASULAK S, YOOVIDHYA T, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* in zein-alginate core-shell microcapsules via electrospraying [J]. Journal of Functional Foods, 2014, 7: 342-349.
- [41] KHAN N H, KORBER D R, LOW N H, et al. Development of extrusion-based legume protein isolate-alginate capsules for the protection and delivery of the acid sensitive probiotic, *Bifidobacterium adolescentis*[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 730-737.
- [42] ZAEIM D, GHORANI B, SARABIJAMAB M, et al. Electrospray assisted fabrication of hydrogel microcapsules by single- and double-stage procedures for encapsulation of probiotics[J]. Food & Bioproducts Processing, 2017, 102: 250-259.
- [43] MARIA C, IZASKUN M, ARES R, et al. Microencapsulation of a probiotic and prebiotic in alginate-chitosan capsules improves survival in simulated gastro-intestinal conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 142(1/2): 185-189.
- [44] 陈合, 宋雅娟, 王野, 等. 除氧剂及益生元对双歧杆菌 BB01 和 BB28 微胶囊化的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 5-10.
- [45] 胡珊, 黄皓, 梁卫驱, 等. 定向释放型乳酸菌微胶囊的制备[J]. 广东农业科学, 2014, 41(5): 138-140.
- [46] CHEOW W S, KIEW T Y, HADINOTO K. Effects of adding resistant and waxy starches on cell density and survival of encapsulated biofilm of *Lactobacillus rhamnosus* GG probiotics [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 69: 497-505.
-
- (上接第 203 页)
- [24] LEE H, KIM J E, CHUNG M S, et al. Cold plasma treatment for the microbiological safety of cabbage, lettuce, and dried figs[J]. Food Microbiology, 2015, 51: 74-80.
- [25] MISRA N N, SCHLUTER O, CULLEN P J. Cold plasma in food and agriculture: Fundamentals and applications[M]. Amsterdam: Academic Press, 2016: 368.
- [26] ATTRI P, VENKATESU P, LEE M J. Influence of osmolytes and denaturants on the structure and enzyme activity of α -chymotrypsin [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2010, 114(3): 1 471-1 478.
- [27] ANDO Y, HAGIWARA S, NABETANI H. Thermal inactivation kinetics of pectin methylesterase and the impact of thermal treatment on the texture, electrical impedance characteristics and cell wall structure of Japanese radish (*Raphanus sativus* L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 199: 9-18.
- [28] BAUER A, NI Y, BAUER S, et al. The effects of atmospheric pressure cold plasma treatment on microbiological, physical-chemical and sensory characteristics of vacuum packaged beef loin[J]. Meat Science, 2017, 128: 77-87.
- [29] KUZMINOVA A, KRETKOVÁ T, KYLIÁN O, et al. Etching of polymers, proteins and bacterial spores by atmospheric pressure DBD plasma in air [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(13): 135-201.
- [30] MA Ruo-nan, WANG Guo-min, TING Ying, et al. Non-thermal plasma-activated water inactivation of food-borne pathogen on fresh produce[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 300: 643-651.
- [31] MA Ruo-nan, YU Shuang, WANG Guo-min, et al. Effect of non-thermal plasma-activated water on fruit decay and quality in postharvest Chinese bayberries[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(11): 1 825-1 834.