

# 农产品射频杀菌钝酶技术研究进展

## Research progress of blunt enzyme technology for radiofrequency sterilization of agricultural products

董翼飞<sup>1,2,3,4</sup> 凌建刚<sup>1,2,3</sup> 朱麟<sup>1,2,3</sup> 李苏红<sup>4</sup>

DONG Yi-fei<sup>1,2,3,4</sup> LING Jian-gang<sup>1,2,3</sup> ZHU Lin<sup>1,2,3</sup> LI Su-hong<sup>4</sup>

(1. 宁波市农科院农产品加工研究所, 浙江 宁波 315000; 2. 国家蔬菜加工技术研发专业中心, 浙江 宁波 315000; 3. 宁波市农产品保鲜工程重点实验室, 浙江 宁波 315000; 4. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110866)

(1. Institute of Agricultural Products Processing, Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo, Zhejiang 315000, China; 2. National Vegetable Processing Technology Research and Development Professional Center, Ningbo, Zhejiang 315000, China; 3. Ningbo Key Laboratory of Agricultural Products Preservation Engineering, Ningbo, Zhejiang 315000, China; 4. Food College, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866, China)

**摘要:**农产品中通常含有大量的腐败菌和内源酶,这些腐败菌和内源酶会对农产品品质造成不良的影响。射频是一种介电加热技术,其加热速度快、效率高,能有效地灭活农产品中的微生物和内源酶而且对农产品的品质(如色泽、质地以及营养成分等)影响较小。文章综述了射频杀菌钝酶技术的作用机制以及近年来在农产品加工中的应用进展,指出了射频杀菌钝酶技术的不足及解决方案,并对射频杀菌钝酶技术未来在农产品和食品中的应用进行了展望。

**关键词:**农产品;射频加热;杀菌;钝酶;加热均匀性

**Abstract:** Agricultural products usually contain a large number of spoilage bacteria and endogenous enzymes, which can adversely affect the quality of agricultural products. Radio frequency is a kind of dielectric heating technology, which has fast heating speed and high efficiency, can effectively inactivate microorganisms and endogenous enzymes in agricultural products and has little influence on the quality of agricultural products, such as color, texture and nutritional composition, etc. This review summarized the mechanism of action of radiofrequency sterilization blunt enzyme technology and its application in agricultural products processing in recent years, and the shortcomings and solutions of radiofrequency sterilization blunt

enzyme technology was pointed out. Moreover, the future application of radiofrequency sterilization blunt enzyme technology in agricultural products and food was also prospected.

**Keywords:** agricultural products; radio frequency heating; sterilization; blunt enzymes; heating uniformity

农产品在采摘、运输和贮藏过程中极易受到各种病原菌和腐败菌的浸染<sup>[1]</sup>,当农产品遭受机械性损伤后会与自身内源酶反应,造成农产品褐变,并且加速组织氧化,从而导致农产品的腐败<sup>[2]</sup>。这不仅会造成巨大的经济损失,病原菌产生的毒素还会对人和牲畜健康造成极大威胁。因此,抑制农产品中内源酶活性和微生物的生长繁殖对提高农产品的货架期、保持农产品的品质以及解决农产品安全问题至关重要。

目前,国内外研究的各种加热技术已达到杀菌和灭酶的目的,传统加热技术主要有高温蒸汽、热水和热风加热,其一般通过热对流和热传递的方式直接或间接对物料进行加热,导热速度慢、耗时长、耗能高,而且物料长时间暴露在高温下会对农产品质地以及营养物质产生较大影响<sup>[3]</sup>。对于新鲜的农产品如蔬菜和水果等需要一种温和加热方式,因此研发新型加热技术来克服传统加热技术的局限性至关重要。欧姆加热(Ohmic heating, OH)<sup>[4]</sup>、红外加热(Infrared heating, IR)<sup>[5]</sup>等加热技术应运而生,但新技术也存在局限性。如欧姆加热适用性较差,不适用于导电性差和低水分的物料;红外加热虽加热速度快,传热效率高,但其存在穿透深度低,加热不均匀

**基金项目:**宁波市公益类科技计划项目(编号:202002N3087)

**作者简介:**董翼飞,男,沈阳农业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**凌建刚(1973—),男,宁波市农业科学研究院研究员,博士。E-mail:nbjg@163.com

**收稿日期:**2022-11-18 **改回日期:**2023-03-05

等缺点<sup>[6]</sup>。相对地,射频和微波加热都是介电加热,其加热的均匀性好、加热迅速并且穿透深度比较大,克服了传统加热的低加热效率的缺点。相比于微波加热,射频加热具有更大的穿透深度、稳定的温度控制以及更好的加热均匀性,特别适合热传递较慢的低水分和多孔性的物料,并且它可以快速处理大块和较厚的物料<sup>[7]</sup>。因其低温短时加热、能更好地保持农产品的品质,射频加热技术在未来农产品加工中具有巨大的应用潜力。但是由于物料特性(如介电特性、大小、形状以及水分含量等)不同以及射频电磁场的分布不均匀等问题,使得射频加热均匀性受到影响,限制了其更广泛的产业应用。

文章拟介绍射频加热的基本原理和特点,探讨射频杀菌钝酶的作用机制以及在农产品中的应用,并针对射频杀菌钝酶技术的不足提供一些优化的措施,以期对射频杀菌钝酶技术产业化应用提供参考。

## 1 射频加热技术

### 1.1 射频加热简介

射频(Radio frequency, RF)是一种高频交变电磁波,其频率在 3 kHz~300 MHz 范围内<sup>[8]</sup>,具有加热速度快,穿透深度大等优点,并且在干燥、杀菌、钝酶及解冻等方面有巨大的应用前景<sup>[9]</sup>。为了避免射频电磁波对通讯产生干扰,美国联邦通讯委员会(Federal communications commission, FCC)规定在工业、医药行业和商业中允许射频使用的频率为 13.56, 27.12, 40.68 MHz<sup>[10]</sup>。

### 1.2 射频加热基本原理

如图 1,射频加热是介电加热,当电磁波穿透入物料内部时,随着电场方向不断变化,会导致物料内部的极性分子和带电离子的震荡迁移,不断向带有相反电荷的电极板方向移动,分子间相互摩擦,从而将电磁能转化为热能,以加热物料,从而达到杀虫、杀菌及钝酶的目的<sup>[11]</sup>。

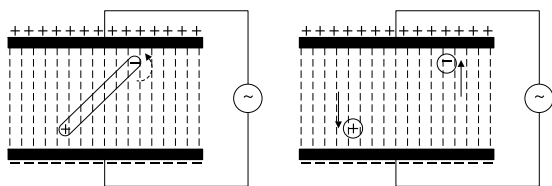


图 1 射频加热中偶极子旋转和离子传导示意图

Figure 1 Schematic diagram of dipole rotation and ion conduction in RF heating

平行电极板射频加热系统常用于农产品的加工领域,如图 2 所示,射频系统可以简化为由上下两个极板组成的电容器。接通电源后,交变电磁波作用于物料内部。

### 1.3 介电特性

不同物料甚至同一物料不同的部位具有不同的介电特性,介电特性对射频加热的效果具有显著的影响。

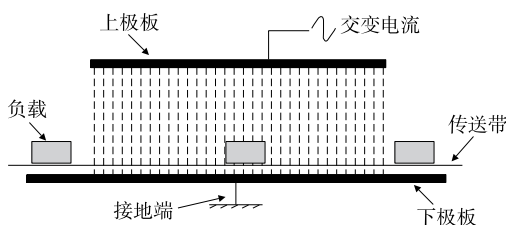


图 2 平行板式射频加热系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of parallel plate RF heating system

介电特性由介电常数和介电损耗来表示<sup>[12]</sup>,表述为:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

式中:

$\epsilon^*$ ——复介电特性, F/m;

$\epsilon'$ ——介电常数(反映介电材料吸收和储存电场能量的能力), F/m;

$j$ ——虚数单位,  $j = \sqrt{-1}$ ;

$\epsilon''$ ——介电损耗(反映电磁能转化为热能的能力), F/m。

农产品的介电特性受各种因素影响,如密度、温度、水分含量、化学组成(如蛋白质、淀粉等)、频率和温度<sup>[13]</sup>。在一定的电磁频率下,农产品的介电特性和损耗因子会随着温度的升高而增大。并且介电损耗与农产品的水分含量有密切关系,水分含量越高,其介电损耗也就越大<sup>[14]</sup>。不同的农产品因其蛋白质、水分以及其他成分的不同而出现不同的介电参数<sup>[15]</sup>。

射频和微波加热都是介电加热,物料吸收的能量与物料介电特性、频率及密度都有密切关系。射频加热过程中的升温公式可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 2\pi f E^2 \epsilon_0 \epsilon'' \quad (2)$$

式中:

$\rho$ ——物料密度, kg/m<sup>3</sup>;

$C_p$ ——物料比热, J/(kg·°C);

$\Delta T$ ——物料的升温速率, °C;

$f$ ——频率, Hz;

$E$ ——电场强度, V/m;

$\epsilon_0$ ——真空介电常数,  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m。

由式(2)可知,物料的升温速率与物料的介电损耗因子、射频频率及电场强度的平方成正比,与物料的比热容及密度成反比。因此除了电场强度和介电常数外,物料的比热容和密度也会对射频加热速率产生影响。

## 2 射频杀菌

传统杀菌技术如巴氏杀菌(62~90 °C)和高压蒸汽灭菌(HPSS; 121 °C, 30 min)杀菌时间较长、温度高,而且直接与物料表面接触会导致物料的品质严重恶化<sup>[17]</sup>。而射

频凭借其加热速度快、穿透深度大、加热效率高以及能够对物料内外同时加热从而避免物料表面温度远高于中心温度等优点,被用作一种高效且温和的巴氏杀菌技术。射频巴氏杀菌技术不仅适用于中高含水量的物料中,而且对于低含水量的物料杀菌效果更佳。应用射频杀菌技术可以杀灭农产品中常见的沙门氏菌、大肠杆菌、葡萄球菌及霉菌等食源性病原微生物,杀菌效果优异且能减少农产品营养品质的损失<sup>[18]</sup>。

### 2.1 射频杀菌机制

了解射频处理过程中电磁波对微生物细胞的影响,对于优化射频在农产品巴氏杀菌中的应用是非常必要的。学界对射频杀菌的作用机制一直存在争议,其杀菌机制可能有两个方面:①热效应。即射频电场在农产品基质内产生热量引起。②非热效应。即电磁波杀菌<sup>[19]</sup>。其中,热效应机制已经被广泛接受<sup>[20]</sup>。李玉林等<sup>[21]</sup>研究认为,射频电磁波穿透入物料内部,当电场方向发生改变时,会引起物料内部的极性分子和带电离子的剧烈振荡,相互摩擦,从而产生高温。在高温作用下,微生物营养体细胞和酶会遭到破坏,导致微生物细胞的结构和活性发生改变,从而达到杀灭微生物目的。

射频电磁波对微生物有非热杀菌效应的争议话题一直存在。电磁波长时间作用于微生物,微生物细胞会吸收大量的电磁能量,从而导致细胞DNA的碱基中的氢键断裂,阻碍DNA的复制和转录等程序的运转,从而杀死微生物<sup>[22]</sup>。Guo等<sup>[23]</sup>认为细胞膜的孔隙可能通过电穿孔机制产生,细胞内生物大分子如DNA和蛋白质可能被电磁场耦合破坏。Xue等<sup>[24]</sup>将电磁波巴氏杀菌与传统热杀菌进行对比研究,发现相同条件下电磁波处理后样品中的微生物降低量显著高于传统热处理,因此提出电磁波存在非热效应。Siguemoto等<sup>[25]</sup>通过对接种在苹果汁中的大肠杆菌和单核增生细胞李斯特菌进行常规热处理和微波巴氏杀菌处理,结果发现,与常规热处理相比,微波巴氏杀菌处理增强了大肠杆菌和单核细胞增生的李斯特菌的灭活效果。然而,许多学者指出射频或微波不存在非热效应,并且认为这些非热效应的结论是在未考虑实际加热过程中物料的加热均匀性和加热速率等因素对微生物灭活的影响下得出的。Kou等<sup>[20]</sup>以苹果汁和土豆泥为代表性样品通过热死时间(TDT)加热块系统模拟研究了RF的热效应和非热效应机制。结果显示,在达到相同的温度条件下,两个样品的微生物灭活无显著差异;27.12 MHz的RF系统中不存在使微生物灭活的非热效应。Cui等<sup>[26]</sup>采用RF和热水(HW)加热食品微生物来探究RF的杀菌机制,发现RF和HW处理的微生物在亚致死温度下细胞结构破坏和蛋白质变性差异不显著,而且在细胞致死性或结构变化中未观察到RF的非热效应。

因此,射频的非热杀菌机制还需进一步试验验证。

### 2.2 射频杀菌在农产品中的应用

吕晓英等<sup>[27]</sup>采用射频加热技术,使猕猴桃汁中的沙门氏菌下降8个数量级以上;Xu等<sup>[28]</sup>指出射频处理可以使荞麦中微生物数量下降8个数量级;Tong等<sup>[29]</sup>通过射频杀菌技术,使黑胡椒中的大肠杆菌和沙门氏菌下降6个数量级以上,且认为射频对黑胡椒的品质无显著的影响;类似研究在坚果、粮食、果蔬、水产、香辛料等多类农产品应用中被广泛报道(详见表1),说明射频巴氏杀菌技术可以很好地替代传统巴氏杀菌来杀灭农产品中的微生物。

### 2.3 射频杀菌对农产品品质的影响

射频在杀菌的同时,对农产品的品质也会产生一定的影响。在研究射频杀菌效果的同时,国内外研究员也不断探讨射频对农产品中感官品质(色泽、质地)以及营养品质(维生素、矿物质、蛋白质等)的影响。杀菌效果是评价杀菌技术的一大指标,但是杀菌手段对农产品的感官品质和营养品质的影响是判断杀菌手段是否有效的前提和基础。大量研究<sup>[27-28,32-33,40-43]</sup>表明,射频杀菌对农产品的品质(感官和营养品质)无显著影响,甚至可以更好地保持农产品的品质(详见表2)。

## 3 射频钝酶

### 3.1 射频钝酶机制

除微生物安全外,农产品中的内源酶导致的农产品腐败和褐变也是农产品保鲜的一大难题,内源酶的生长活动会导致农产品的色泽、质地和风味发生劣变。与之相关的酶如多酚氧化酶(PPO)能将果蔬中的多酚类物质催化氧化成黑色素从而引起果蔬褐变、过氧化物酶(POD)能够利用PPO氧化多酚类物质产生的 $H_2O_2$ 来催化氧化酚类物质从而参与果蔬的褐变、果胶酯酶(PME)能够催化和水解果蔬中的果胶物质<sup>[44]</sup>,以及脂肪氧化酶(LOX)能够催化氧化多元不饱和脂肪酸,造成农产品的腐败并产生异味<sup>[45]</sup>。为了使这些酶失活,进而降低农产品在运输、贮藏和加工过程中的营养和品质损失,选择合适的钝酶方法至关重要。

射频加热速度快,能在短时间内对物料进行整体性加热,从而达到有效的钝酶效果。其钝酶作用主要是热效应引起的<sup>[46]</sup>。酶是由蛋白质组成,并且其结构主要由氢键、离子键等弱的分子作用力来维持。在高温作用下,氢键和离子键等分子作用力会被破坏,蛋白质的二、三、四级结构会发生改变,由催化活性结构转变为无规则的卷曲结构,导致蛋白质的不可逆失活,从而导致酶活性丧失<sup>[45]</sup>。Manzocco等<sup>[47]</sup>研究了不同电场强度对模型系统和苹果衍生物的酶的活性影响及射频钝酶的机制。结果表明,射频钝酶是由热效应所导致,其电磁效应可以忽略不计。

表 1 射频杀菌技术在农产品中的应用

Table 1 Application of radio frequency sterilization technology in agricultural products

农产品	品种	微生物	处理条件	微生物降低量/ lg(CFU · g <sup>-1</sup> )	参考文献
坚果类	核桃	金黄色葡萄球菌	射频加热至 70 ℃ 保温 40 min	4	[30]
	巴旦木	大肠杆菌	射频加热至 72 ℃ 热风保温 15 min	>4	[31]
	栗子	青霉菌	热风辅助射频加热至 60 ℃	4	[32]
	杏仁	大肠杆菌	电极间距 10.5 cm 射频加热 1.5 min	5	[33]
粮谷类	玉米	寄生曲霉	射频加热至 70 ℃ 保温 14 min	6	[34]
	荞麦	微生物	射频加热至 90 ℃	8	[28]
	玉米	寄生性假丝酵母菌	射频加热至 70 ℃ 热风保持 12 min	5~6	[35]
果蔬类	猕猴桃汁	沙门氏菌	板极间距 105 mm 猕猴桃厚度 45 mm 射频加热 210 s	8	[27]
	胡萝卜	微生物	板极间距 20 mm 射频加热 30 min	4	[36]
水产类	太平洋酱菜	枯草杆菌孢子	射频加热 19 min	5	[37]
	发菜	细菌	射频加热 20 min	<10 <sup>-3</sup> (符合国家标准)	[38]
香料类	黑胡椒	鼠伤寒沙门氏菌 大肠杆菌	电极间距 12.5 cm 射频处理 7~8 min	>6	[29]
	孜然籽	沙门氏菌	射频加热 2 min	5	[39]

表 2 射频杀菌对农产品品质的影响

Table 2 Effect of radio frequency sterilization on the quality of agricultural products

农产品	杀菌条件及效果	产品品质	参考文献
念珠藻	射频—热水处理 20 min, 微生物菌落降低 3~4 个数量级	念珠藻色泽、质地以及藻蓝蛋白稳定性较好, 与高压蒸汽灭菌相比, RF 处理 20 min, 抗坏血酸含量保留率较高	[42]
猕猴桃汁	板极间距 105 mm, 杀菌时间 210 s, 猕猴桃汁厚度 45 mm, 沙门氏菌降低 8.1 个数量级	猕猴桃汁维生素保留率为 98.1%, 显著高于普通的巴氏杀菌	[27]
真空包装菜心	热空气辅助射频 5, 10, 20, 30 min 至 60 ℃; 总菌落数最多减少 3~4 个数量级	RF 处理和未处理的样品之间无显著差异	[43]
栗子	热空气辅助射频 >7 min 至 56~62 ℃; 温度高于 60 ℃ 导致结壳假单胞菌减少 4 个数量级	热空气辅助射频热处理和未处理对照之间未观察到水分、硬度和颜色的显著差异	[32]
荞麦	90 ℃、0 min 射频, 菌落数减少值 3 个数量级以下	理化性质(水分、蛋白质和淀粉)无显著变化	[28]
杏仁	热风温度 55 ℃, 板极间距 10.5 cm, 射频加热 1.5 min, 大肠杆菌菌落减少 5 个数量级	杏仁的理化品质(如色差、水分含量、游离脂肪酸)未受到 RF 的影响	[33]

### 3.2 射频钝酶在农产品中的应用

传统热加工技术虽然对农产品钝酶具有一定的功效,但会导致农产品的营养物质流失、组织变软,使其品质发生劣变。高效钝酶的同时,最大限度地减少农产品品质的损失也至关重要。Yao 等<sup>[48]</sup>研究了不同的射频加热速率使茎苜苣中的 POD 失活速率的影响以及对茎苜苣的理化性质的影响,结果显示,加热速率越快 POD 的失活效率越高,当 POD 活性降低到 <5% 时,与热水烫漂

相比,射频烫漂对茎苜苣的理化性质影响更小。Jiang 等<sup>[6]</sup>发现与热水烫漂相比,射频与烫漂相结合甘薯的色泽和质地会更好,且甘薯的失重较小。Zhang 等<sup>[45]</sup>利用射频加热技术钝化青豌豆中的 LOX 和 POD,发现与热水烫漂相比,射频处理后,其维生素和矿物质的含量变化相对较小。表 3 列出了近年来射频在农产品钝酶领域应用的相关研究成果,其结果反映出射频具有一定的钝酶效果,应用前景广阔。

表 3 射频钝酶在农产品中的应用

Table 3 Application of radio frequency blunt enzyme in agricultural products

农产品	内源酶	处理条件	试验结果	参考文献
甘薯	POD	RF 加热至 90 °C 并保持 6 min	酶活降至 5.87%	[6]
青豌豆	POD	RF 加热至 85 °C, 电极间隙 105 mm	酶活分别降至 (1.10±0.78)%, (0.90±0.78)%	[45]
米糠	LOX	RF 加热至 100 °C 并保持 10 min	酶活降至 5.50%	[49]
马铃薯	PPO	RF 加热至 90 °C	酶活降至 1.35%	[50]
苜苣	POD	RF 加热至 80 °C	酶活降至 6.46%	[51]
苹果	PPO	电极间隙 120 mm, RF 处理 120 s	酶全部失活	[52]
桃	PPO	RF 加热分别至 70, 80 °C, 并保持 1 min	酶活性分别降至 14.54%, 6.50%	[53]
胡萝卜	POD	电极间距 8.0~8.6 cm, RF 处理 3~7 min	酶活性降低至 <5.00%	[54]

## 4 射频杀菌钝酶的不足及改进

### 4.1 射频杀菌钝酶的不足

目前,射频在农产品中的产业化应用尚不全面,特别是在水产品中应用较少,射频杀菌和钝酶的作用机制仍存在争议,未来还需进一步研究,并且绝大多数有关射频杀菌钝酶技术还停留在小型试验阶段。射频设备花费高、对射频操作及原理不熟悉、加工工艺复杂以及射频加热不均匀性等问题,严重阻碍了射频工业的发展。其中射频加热不均匀性问题是农产品杀菌钝酶过程中的主要问题,电磁场分布和物料的介电特性、形状、初始温度分布以及水分含量都会对射频加热均匀性产生较大影响,过热会引起农产品热损伤,低温会造成农产品中微生物和酶的低灭活率,大大降低了杀菌灭酶的效率<sup>[55]</sup>。

引起射频加热不均匀的原因有:① 热偏移效应。射频加热会集中在温度较高的部位,且温度与介电损耗因子成正比,温度越高,介电损耗因子越大,吸收能量越多,其升温速率越快,容易使物料该部分产生过热现象,影响农产品品质<sup>[56]</sup>。② 边角集中效应。由于电磁场分布不均匀,电磁场优先穿过厚度较薄的地方,容易导致热量集中在物料边角位置,从而导致边角区域加热过度<sup>[34]</sup>。③ 物料形状效应。射频能量容易集中在物料厚度较大的部位,导致升温速率大,从而出现局部过热现象<sup>[57]</sup>。④ 水分含量影响。物料的介电特性与水分含量成正比,

物料的水分含量越高,其介电损耗因子越大,物料升温速率越大<sup>[14]</sup>。

### 4.2 射频工艺优化

为了改善射频杀菌钝酶的不均匀问题,相关研究人员开展了诸多有益的尝试。传统热加工技术以及螺旋搅拌与射频相结合可以改变农产品表面的冷点和热点的位置,显著提高了射频杀菌钝酶的均匀性。热风与射频结合,热风可消除物料表面的水分凝结并且增加射频处理过程中物料表面的对流传热,从而提高加热均匀性和效率,如 Wei 等<sup>[58]</sup>利用热风辅助射频的杀菌法,将奶粉加热至 95 °C,保持 15 min 后,可以使沙门氏菌下降 5 个数量级,且与巴氏杀菌相比,大大减少了杀菌时间。热水与射频相结合可以提高加热的均匀性和效率,Jiang 等<sup>[6]</sup>将射频与热水结合,有效地钝化了甘薯中的 POD,与热水烫漂相比,射频与热水联合烫漂可以作为甘薯有效、均匀和高质量的烫漂技术。

据报道<sup>[59]</sup>,不均匀的电磁场分布对射频加热均匀性具有显著的影响。通过改变电磁能量分布可以提高射频加热均匀性<sup>[60]</sup>。计算机仿真模拟技术可以预测和修改电磁场方向,以提高射频杀菌钝酶技术的均匀性。Zhang 等<sup>[61]</sup>研究表明,在射频加热过程中将花生籽粒分割成块并在块与块之间增加气隙可增强其加热的均匀性。

## 5 展望

射频是一种向物料内部传递电磁能量波,然后转化

为热能的热加工技术,具有快速和高效的加热优势,可以用来替代传统的热加工技术。射频加热在农产品和食品的杀菌及灭酶等方面应用广泛,且未来在农产品和食品工业中具有巨大的应用前景。穿透深度大、效率高且有效减少对农产品品质的影响是射频杀菌钝酶技术的优势,但是射频杀菌的机制尚且存在争议,还需试验进一步验证。射频在杀菌灭酶过程中加热不均匀性问题严重阻碍了射频工业化发展,通过热水、热风以及搅拌等传统方式的辅助以及改变射频电磁场的分布可以提高射频杀菌灭酶的均匀性和效率。另外,随着计算机技术不断成熟,未来通过利用计算机模拟技术可以更好地预测物料内部电磁场及温度的分布,从而探索出更合理的射频杀菌灭酶方案。

### 参考文献

- [1] 王萍, 王玲, 于新, 等. 菜心采后贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(19): 6 957-6 958.  
WANG P, WANG L, YU X, et al. Research advances in postharvest storage and preservation techniques of Chinese flowering cabbage [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(19): 6 957-6 958.
- [2] 毛相朝, 李娇, 陈昭慧. 非热加工技术对食品内源酶的控制研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 1-13.  
MAO X C, LI J, CHEN Z H. Progress of research on the control of endogenous enzymes in food by non-thermal processing technology [J]. Journal of Chinese Institute Food Science and Technology, 2021, 21(12): 1-13.
- [3] PENG J, YIN X, JIAO S S, et al. Air jet impingement and hot air-assisted radio frequency hybrid drying of apple slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 108517.
- [4] SHAO L L, ZHAO Y J, ZOU B, et al. Ohmic heating in fruit and vegetable processing: Quality characteristics, enzyme inactivation, challenges and prospective [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 601-616.
- [5] ZENG S Y, LI M G, LI G H, et al. Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 121: 76-92.
- [6] JIANG H Y, LING B, ZHOU X, et al. Effects of combined radio frequency with hot water blanching on enzyme inactivation, color and texture of sweet potato [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102513.
- [7] LIAO M J, DAMAYANTI W, XU Y R, et al. Hot air-assisted radio frequency heating for stabilization of rice bran: Enzyme activity, phenolic content, antioxidant activity and microstructure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109754.
- [8] CAO F F, ZHANG R Y, TANG J M, et al. Radio frequency combined hot air (RF-HA) drying of tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fillets: Drying kinetics and quality analysis [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102791.
- [9] BEDANE T F, CHEN L, MARRA F, et al. Experimental study of radio frequency (RF) thawing of foods with movement on conveyor belt[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 201: 17-25.
- [10] ZHOU X, WANG S J. Recent developments in radio frequency drying of food and agricultural products: A review [J]. Drying Technology, 2018, 37(11): 1-16.
- [11] 王楠, 侯旭杰. 新型加热技术在食品加工中的应用及其研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(4): 209-215.  
WANG N, HOU X J. Application of new heating technology and its research progress[J]. Food Research and Development, 2019, 40(4): 209-215.
- [12] XU Y Y, XIANG P, QIU W Q, et al. Dielectric properties of the Maillard reaction solution formed between enzymatic hydrolysate of Antarctic krill and glucose under microwave heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 161: 113355.
- [13] LLAVE Y, ERDOGDU F. Radio frequency processing and recent advances on thawing and tempering of frozen food products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(3): 598-618.
- [14] TIWARI G, WANG S X, TANG J J, et al. Analysis of radio frequency (RF) power distribution in dry food materials [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 548-556.
- [15] WANG S X, TANG J J, JOHNSON J A, et al. Dielectric properties of fruits and insect pests as related to radio frequency and microwave treatments[J]. Biosystems Engineering, 2003, 85(2): 201-212.
- [16] NELSON S O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control[J]. Transactions of the Asae, 1996, 39(4): 1 475-1 484.
- [17] ZHANG Y, XIE Y K, TANG J M, et al. Thermal inactivation of *Cronobacter sakazakii* ATCC 29544 in powdered infant formula milk using thermostatic radio frequency[J]. Food Control, 2020, 114: 107270.
- [18] 白静, 岳田利, 王虎玄. 射频加热杀灭浓缩苹果汁中鲁氏接合酵母的工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 273-279.  
BAI J, YUE T L, WANG H X. Optimization of *Zygasaccharomyces rouxii* sterilization from concentrated apple juice by radio frequency heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 273-279.
- [19] XU J C, ZHANG M, BHANDARI B, et al. ZnO nanoparticles combined radio frequency heating: A novel method to control microorganism and improve product quality of prepared carrots[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 46-53.
- [20] KOU X X, LI R, HOU L X, et al. Identifying possible non-thermal effects of radio frequency energy on inactivating food microorganisms[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 337: 109255.

- 2018, 269: 89-97.
- [21] 李玉林, 焦阳, 王易芬. 射频加热技术在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 197-202.  
LI Y L, JIAO Y, WANG Y F. Application of radio frequency heating technology in food industry[J]. Food & Machinery, 2017, 33(12): 197-202.
- [22] 王德东, 徐雪萌, 李孝忠. 电磁波杀菌在无菌包装中应用的探讨[J]. 包装与食品机械, 2004, 22(4): 39-42.  
WANG D D, XU X M, LI X Z. The discuss on the application of electromagnetic wave for sterilization in aseptic packaging [J]. Packaging & Food Machinery, 2004, 22(4): 39-42.
- [23] GUO Q S, SUN D W, CHENG J H, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 67: 236-247.
- [24] XUE Q Q, XUE C H, LUAN D L, et al. Comprehensive investigation into quality of pasteurized *Oncorhynchus keta* Walbaum fillets and non-thermal effects of microwave[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 146: 111466.
- [25] SIGUEMOTO É S, GUT J A W, MARTINEZ A, et al. Inactivation kinetics of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* in apple juice by microwave and conventional thermal processing [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45: 84-91.
- [26] CUI B Z, SUN Y N, WANG K, et al. Pasteurization mechanism on the cellular level of radio frequency heating and its possible non-thermal effect [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103026.
- [27] 吕晓英, 王绍金, 吴倩, 等. 猕猴桃汁射频杀菌工艺初探[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 267-270.  
LU X Y, WANG S J, WU Q, et al. Preliminary study on sterilization technology of kiwifruit juice by radio frequency treatment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(2): 267-270.
- [28] XU J J, YANG G J, LI R, et al. Effects of radio frequency heating on microbial populations and physicochemical properties of buckwheat[J]. International Journal of Food Microbiology, 2022, 363: 109500.
- [29] TONG T Y, WANG P Z, SHI H, et al. Radio frequency inactivation of *E. coli* O157: H7 and *Salmonella Typhimurium* ATCC 14028 in black pepper (*piper nigrum*) kernels: Thermal inactivation kinetic study and quality evaluation[J]. Food Control, 2022, 132: 108553.
- [30] 张莉慧. 核桃射频杀菌机制及方法研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020: 105.  
ZHANG L H. Mechanistic and methodological studies on pasterization of in-shell walnuts using radio frequency energy[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2020: 105.
- [31] 李瑞. 采后巴旦木的射频杀菌技术研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019: 8.  
LI R. Pasteurization technologies of postharvest almonds using radio frequency heating [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2019: 8.
- [32] HOU L X, KOU X K, LI R, et al. Thermal inactivation of fungi in chestnuts by hot air assisted radio frequency treatments[J]. Food Control, 2018, 93: 297-304.
- [33] LI R, KOU X X, CHENG T, et al. Verification of radio frequency pasteurization process for in-shell almonds[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 192: 103-110.
- [34] 郑阿娟. 玉米籽粒射频杀菌工艺研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017: 30.  
ZHENG A J. Pasteurization of postharvest corn using radio frequency heating [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2017: 30.
- [35] ZHENG A J, ZHANG L H, WANG S J. Verification of radio frequency pasteurization treatment for controlling *Aspergillus parasiticus* on corn grains [J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 249: 27-34.
- [36] 孔玲, 张慜. 射频-热风联合杀菌对小包装胡萝卜丁品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(9): 943-948.  
KONG L, ZHANG Y. Impacts of RF-hot air sterilizing on the quality of carrots in a small package[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2015, 34(9): 943-948.
- [37] UEMURA K, KANAFUSA S, TAKAHASHI C, et al. Development of a radio frequency heating system for sterilization of vacuum-packed fish in water [J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 2017, 81(4): 762-767.
- [38] XU J C, MIN Z, AN Y J, et al. Effects of radio frequency and high pressure steam sterilization on the color and flavor of prepared *Nostoc sphaeroides* [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2017, 98(5): 1 719-1 724.
- [39] CHEN L, IRMAK S, CHAVES B D, et al. Microbial challenge study and quality evaluation of cumin seeds pasteurized by continuous radio frequency processing [J]. Food Control, 2020, 111: 107052.
- [40] ZHANG Y, PANDISELVAM R, ZHU H K, et al. Impact of radio frequency treatment on textural properties of food products: An updated review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 154-166.
- [41] LI Y L, LI F, TANG J M, et al. Radio frequency tempering uniformity investigation of frozen beef with various shapes and sizes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 48: 42-55.
- [42] XU J C, ZHU S N, ZHANG M, et al. Combined radio frequency and hot water pasteurization of *Nostoc sphaeroides*: Effect on temperature uniformity, nutrients content, and phycoyanin stability[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 141: 110880.
- [43] LIU Q, ZHANG M, XU B G, et al. Effect of radio frequency heating on the sterilization and product quality of vacuum packaged Caixin[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 95:

- 47-54.
- [44] 刘伟, 宋弋, 张洁, 等. 超声波对果蔬汁杀菌和品质影响的研究进展[J]. 现代食品科技, 2018, 34(5): 276-289.  
LIU W, SONG Y, ZHANG J, et al. Research progress on the effect of ultrasound on the microbial inactivation and qualities of fruit and vegetable juice[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(5): 276-289.
- [45] ZHANG C Y, HU C C, SUN Y N, et al. Blanching effects of radio frequency heating on enzyme inactivation, physiochemical properties of green peas (*Pisum sativum* L.) and the underlying mechanism in relation to cellular microstructure [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128756.
- [46] 张振娜, 刘祥宇, 王云阳. 果蔬烫漂护色技术应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(10): 2 411-2 418.  
ZHANG Z N, LIU X Y, WANG Y Y. Research progress in the application of blanching and color-protecting of fruits and vegetables[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(10): 2 411-2 418.
- [47] MANZOCCO L, ANESE M, NICOLI M C. Radiofrequency inactivation of oxidative food enzymes in model systems and apple derivatives[J]. Food Research International, 2008, 41(10): 1 044-1 049.
- [48] YAO Y S, SUN Y N, CUI B Z, et al. Radio frequency energy inactivates peroxidase in stem lettuce at different heating rates and associate changes in physiochemical properties and cell morphology[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128360.
- [49] LING B, LYNG J G, WANG S J. Effects of hot air-assisted radio frequency heating on enzyme inactivation, lipid stability and product quality of rice bran [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 91: 453-459.
- [50] ZHANG Z N, YAO Y S, SHI Q L, et al. Effects of radio-frequency-assisted blanching on the polyphenol oxidase, microstructure, physical characteristics, and starch content of potato[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109357.
- [51] YAO Y S, WEI X J, PANG H Y, et al. Effects of radio-frequency energy on peroxidase inactivation and physiochemical properties of stem lettuce and the underlying cell-morphology mechanism[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126753.
- [52] ZHANG X Y, SHI Q L, GAO T, et al. Developing radio frequency blanching process of apple slice[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 273: 109832.
- [53] LARA G, TAKAHASHI C, NAGAYA M, et al. Improving the shelf life stability of vacuum-packed fresh-cut peaches (*Prunus persica* L.) by radio frequency heating in water[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 57(6): 3 251-3 262.
- [54] GONG C T, ZHAO Y Y, ZHANG H J, et al. Investigation of radio frequency heating as a dry-blanching method for carrot cubes[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 245: 53-56.
- [55] DAG D, SINGH R K, KONG F. Effect of surrounding medium on radio frequency (RF) heating uniformity of corn flour[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 307: 110645.
- [56] 刘嫣红, 杨宝玲, 毛志怀. 射频技术在农产品和食品加工中的应用[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 115-120.  
LIU Y H, YANG B L, MAO Z H. Radio frequency technology and its application in agro-product and food processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 115-120.
- [57] ZHANG S, ZHOU L Y, LING B, et al. Dielectric properties of peanut kernels associated with microwave and radio frequency drying[J]. Biosystems Engineering, 2016, 145: 108-117.
- [58] WEI X Y, AGARWAL S, SUBBIAH J. Heating of milk powders at low water activity to 95 °C for 15 minutes using hot air-assisted radio frequency processing achieved pasteurization[J]. Journal of Dairy Science, 2021, 104(9): 9 607-9 616.
- [59] ZHU H K, LI D, LI S J, et al. A novel method to improve heating uniformity in mid-high moisture potato starch with radio frequency assisted treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 206: 23-36.
- [60] ZHU H K, LI D, MA J W, et al. Radio frequency heating uniformity evaluation for mid-high moisture food treated with cylindrical electromagnetic wave conductors[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 56-70.
- [61] ZHANG S, RAMASWAMY H, WANG S J. Computer simulation modelling, evaluation and optimisation of radio frequency (RF) heating uniformity for peanut pasteurisation process[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184: 101-110.
- 
- (上接第 218 页)
- [76] ZHANG Y, GUO M, ZHANG H, et al. *Lactiplantibacillus plantarum* ST-III-fermented milk improves autistic-like behaviors in valproic acid-induced autism spectrum disorder mice by altering gut microbiota[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1005308.
- [77] LIDDICOAT C, SYDNOR H, CANDO-DUMANCELA C, et al. Naturally-diverse airborne environmental microbial exposures modulate the gut microbiome and may provide anxiolytic benefits in mice[J]. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134684.
- [78] KRATSMAN N, GETSELTER D, ELLIOTT E. Sodium butyrate attenuates social behavior deficits and modifies the transcription of inhibitory/excitatory genes in the frontal cortex of an autism model [J]. Neuropharmacology, 2016, 102: 136-145.
- [79] MONTANARI M, MARTELLA G, BONSI P, et al. Autism spectrum disorder: Focus on glutamatergic neurotransmission[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(7): 3 861.
- [80] GHANIZADEH A. Increased glutamate and homocysteine and decreased glutamine levels in autism: A review and strategies for future studies of amino acids in autism[J]. Disease Markers, 2013, 35(5): 281-286.