

微波技术在农产品加工领域的应用研究进展^{*}

黄纪民,李秉正,师德强,黄志民^{**}

(广西科学院,非粮生物质酶解国家重点实验室,国家非粮生物质能源工程技术研究中心,广西生物质炼制重点实验室,广西南宁 530007)

摘要:微波技术具有高效、节能、清洁和易于控制等显著优点,在农产品加工领域中有着广泛的应用。本文介绍微波技术在农业加工领域中干燥、杀菌、灭虫、杀青和烹饪等方面的应用研究进展,并简要分析微波技术应用于上述方面时存在的优缺点。最后,文章指出微波技术目前存在的问题,并对其未来的发展提出建议。

关键词:微波 农产品 干燥 杀菌 烹饪

中图分类号:TS20 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2020)03-0293-07

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20201027.003

0 引言

我国是农业大国,农产品资源十分丰富,粮食、蔬菜和水果等主要农产品的产量多年来一直稳居世界首位。与之不相称的是,我国的农产品加工业仍处于较低水平,与发达国家相比存在较大差距。大力发展农产品加工业,是我国从农业大国走向农业强国的必经之路,对我国农业乃至整个国民经济的发展具有十分重要的意义。农产品加工技术高新化是发展农产品加工业的重要途径之一。近年来,微波技术、膜分离技术、超临界萃取技术、超高压技术和微胶囊技术等农产品加工高新技术不断被开发利用,成为农产品加工业快速发展的助推器。

微波是指波长 1 mm 到 1 m,频率 300 MHz 到 300 GHz 的电磁波,它介于低频的无线电波和高频

的红外线之间,属于非电离辐射。微波技术最早应用于军事领域,随后逐渐扩展到通讯、医学、化工和农产品/食品加工等领域。在世界上大部分地区,工业用微波设备的频率为 915 MHz 和 2 450 MHz,而家用微波设备的频率为 2 450 MHz。微波技术在农产品加工领域应用广泛,涵盖干燥、杀菌、灭虫、杀青和烹饪等众多方面。由于具有高效、节能、清洁和易于控制等显著优点,微波农产品加工技术越来越受到学术界和工业界的重视。

1 微波的作用机理

极性介质在微波场中具有显著的热效应,其原理为极性介质中的偶极子在外加电场中呈方向性排列,当电场方向发生改变时,偶极子的排列方向也随之改变。这一过程中,由于极性分子的变极效应和相邻分

^{*} 广西科技计划项目(桂科 AB18294028)和贺州市创新驱动发展专项(贺科创 ZX0710001)资助。

【作者简介】

黄纪民(1976—),男,硕士,工程师,主要从事农产品和食品加工研究。

【**通信作者】

黄志民(1965—),男,博士,研究员,主要从事生物物理和微波应用技术研究,E-mail:hzmj@163.com。

【引用本文】

黄纪民,李秉正,师德强,等.微波技术在农产品加工领域的应用研究进展[J].广西科学院学报,2020,36(3):293-299.

HUANG J M,LI B Z,SHI D Q,et al. Application of Microwave Technology in Processing of Agro-Products:A Review [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences,2020,36(3):293-299.

子间的相互作用,产生了类似“摩擦”的效果,使极性分子获得能量并以热能的形式表现出来,介质的温度也随之提高。对于微波波段的电磁场而言,由于微波频率可达 10^9 数量级(以常用的2 450 MHz为例),即极性分子每秒钟转向数十亿次,因此“摩擦”效果极为激烈,热效应十分显著。

农产品主要由水、碳水化合物、脂类和蛋白质等极性分子组成,在微波辐照下热效应显著。热效应是农产品微波加工的主要作用机理,熟化、干燥、杀菌、钝酶和杀虫等作用主要通过微波场中物料温度的升高来实现。一般情况下,微波场中的物料温度越高,杀菌^[1]、钝酶^[2]及灭虫^[3]等效果越显著。物料吸收微波的能力不仅取决于微波的功率、频率、处理时间等参数,还取决于物料本身的介电特性。研究农产品的介电特性是掌握和控制微波热效应的基础,对微波参数的选择及微波加工设备的研发具有指导作用^[4]。

微波作用还存在着单纯用热效应无法解释的现象。例如,在相同温度下微波杀菌比传统热杀菌的效果更显著^[5]。另外,有研究发现水果和食用菌经过低功率微波处理后,在不超过室温的条件下即可达到显著的抑制酶活和保鲜效果^[6-8]。为此,部分学者提出微波对微生物、酶存在非热效应的理论^[9]。然而,到目前为止这一理论在学术界仍存在一定争议^[10],有待更深入的系统研究加以证实。

2 微波技术在农产品加工中的应用

2.1 干燥

干燥是微波技术在农产品加工领域中最重要应用。微波干燥的主要优点:(1)物料内外温差小——微波能穿透到物料内部使内外同时升温,从而提高物料内外的温度均匀性;(2)干燥速度快——由于温度梯度方向为由内向外,与蒸汽迁移方向相同,因此与常规方式相比干燥时间大大缩短;(3)热效率高——由于微波直接作用于物料,而设备和空气不消耗热量,所以除了少量的热传导损耗外几乎无其他损耗。微波干燥的独特优点,引起国内外研究者长期广泛的关注。

微波干燥在效率上具有明显优势。Cuccurullo等^[11]研究发现,干燥温度同为65℃时,微波干燥苹果片仅需44 min,而热风干燥则需要238 min。Gong等^[12]分别采用5种方式对黄秋葵进行干燥处理,结果表明,微波干燥仅需10 min即可将黄秋葵含水率从89.08%降低至1.76%,远远短于真空干燥(12

h)、冷冻干燥(24 h)、热风干燥(36 h)和自然干燥(>3 d)。江宁等^[13]在研究杏鲍菇片干燥时发现,采用微波干燥的时间仅为0.78 h,约为热风干燥的1/9,冷冻干燥的1/23;单位能耗为12.13 kWh/kg,约为热风干燥的1/2,冷冻干燥的1/6。更重要的是,微波干燥在降速干燥阶段仍然具有高效率^[14]。

除了干燥时间短、能耗少外,微波干燥产品在品质上也具有优势。王红利等^[15]研究热风干燥、微波干燥和热风-微波联合干燥等不同干燥方式对甘蓝理化性质和抗氧化活性的影响,发现微波干燥的甘蓝不仅维生素C、游离酚和总酚含量均最高,且其DPPH自由基、ABTS⁺自由基清除能力以及Fe³⁺还原能力均最强。Dong等^[16]比较太阳能干燥、热风干燥、微波干燥和冷冻干燥对灵芝复水能力,总酚、黄酮、三萜含量及抗氧化活性等重要质量指标的影响,结果表明与其他干燥方法相比,微波干燥灵芝产品不仅复水率最高,而且总酚和黄酮含量、DPPH自由基清除能力和铁还原能力均最高。微波干燥时间短,且能显著地保持灵芝的抗氧化活性和较高的酚类物质含量,因此是保存灵芝子实体的最佳方法。朱新焰等^[17]对微波干燥法和烘箱干燥法干燥黄精进行比较,发现微波干燥样品的多糖平均含量为12.66%—14.68%,高于烘箱干燥(11.56%—12.54%),而且微波干燥仅需7—10 min,远远少于烘箱干燥法所需的48—72 h。

微波干燥技术不仅可以单独使用,还可与真空冷冻干燥、热风干燥等技术联合使用,弥补其他干燥方式的不足。例如,微波加热属于辐射传能,无须通过传导方式传递热量,可弥补真空冷冻干燥热传导速度慢而导致干燥时间过长的缺陷^[18]。微波干燥与热风干燥联合,不仅可以解决热风干燥效率低的问题,大大缩短干燥时间,而且能降低能耗^[19]。

2.2 杀菌

微波杀菌属于新型热杀菌技术,已被证明对李斯特菌^[20]、霉菌^[21]、大肠杆菌^[22]和金黄色葡萄球菌^[23]等多种有害微生物具有明显的抑制作用。如今,微波不仅可用于环境^[24]和废弃物杀菌^[25],还可大量应用于农产品/食品加工业。除果汁、罐头和卤肉等加工食品外,微波对谷物、新鲜水果、蔬菜等农产品也具有良好的杀菌效果。

苏东民等^[26]通过单因素试验考察小麦粉含水率、微波功率和处理时间等因素对蜡样芽孢杆菌微波杀灭效果的影响,在最优灭菌条件下蜡样芽孢杆菌杀灭率高达99%。彭凯等^[27]在单因素试验的基础上,

利用响应面法优化玉米霉菌的微波灭菌工艺参数,在最佳工艺条件下的灭菌率为99.68%,裂纹率为0,玉米粗蛋白、淀粉及粗脂肪含量的变异系数分别为0.86, 2.26和0.21,表明微波对玉米霉菌具有良好的杀灭效果,且对玉米的品质无不良影响。

除了低含水率的谷物外,微波对含水率较高的核果中多种致病菌同样具有良好的杀菌效果。Xu等^[28]在开展微波控制红枣青霉病的研究时发现,采用2450 MHz微波辐照红枣2-3 min,几乎可以完全控制橘青霉的生长(抑制率98%);此外,微波处理可以将橘青霉发病率从100%降至36%,菌斑直径从1.92 cm减小至1.38 cm,同时对红枣的各项质量参数均无影响。Sisquella等^[29]研究发现,经微波辐照后桃子和油桃褐腐病发生率从45%下降到14%,而且微波加工并未对果实的硬度产生负面影响。Karabulut等^[30]研究发现,对人工接种灰葡萄孢菌和扩展青霉菌的桃子进行2 min的微波处理后,病斑直径和感染面积百分比显著降低;另外,采后贮藏试验结果显示,微波辐照作为贮前处理措施可以有效控制自然感染,而且微波处理既不会造成桃子表面损伤,也不会降低其质量指标。Zhang等^[31]考察了微波辐照对控制桃子中黑霉菌的潜力及其对桃子采后质量的影响,体外研究发现,采用2450 MHz微波处理2 min以上,黑霉菌的生长即受到完全抑制,微波处理后的果实表面伤口中的黑霉菌菌群密度显著低于对照样;体内研究结果表明,微波处理后可将果实腐败率从95%降低至42.1%。

2.3 灭虫

微波被广泛用于杀灭干燥农产品中的害虫,原因是微波加热具有选择性。害虫体内含有很高的水分,因此在微波热效应下很快达到致死温度;而低含水率的农产品升温较小,因此对品质的影响也较弱。

微波灭虫在干燥谷物和坚果中已有较多报道。陈智斌等^[3]发现在水分14%、温度59℃条件下,功率200 W的微波对大米中玉米象虫卵的抑制率为100%。刘杰等^[32]采用915 MHz隧道式工业微波设备对塑料包装大米进行微波处理,发现温度50-70℃条件下处理6 min即可将不同虫态的主要害虫(米象、谷蠹和锯谷盗等)全部杀灭,且微波处理后大米的水分含量、蛋白质含量和外观品质均没有明显变化。Patil等^[33]研究微波辐照对杏仁中赤拟谷盗的控制效果,发现在480 W和600 W功率下分别处理90 s和60 s可达到100%害虫致死率,且微波处理后的

杏仁品质指标均合格,对照组杏仁与微波处理杏仁的脂肪酸组成及感官分析无显著差异;另外,贮藏研究表明,微波处理的杏仁在12个月内无害虫感染及酸败,而未处理的杏仁在3个月内便已变质。

除了低含水率物料外,微波在杀灭新鲜水果中的害虫方面同样具有应用潜力。Gamage等^[34]评估了热风辅助微波设备对苹果果蝇的杀灭效果,发现等效温度52℃条件下,昆士兰果蝇100%致死时间 \geq 50 min,贾维斯果蝇100%致死时间为37 min;同时,微波处理对苹果的固形物含量、果肉及果皮硬度均无不良影响。

近年来,脉冲功率技术的出现提高了微波发射器的实用性,也为微波加工技术提供了新的发展方向。与普通连续微波相比,脉冲微波作用时间短、能耗低、温度分布更均匀^[35]。曾淑薇等^[36]研究了脉冲微波对大米害虫的杀虫效果,发现最优工艺条件下,温度53.8℃即可使大米害虫米象的致死率达100%,而碎米率和爆腰率仅增加1.2%和1.5%。胡婷等^[37]对脉冲微波和普通连续微波处理大米进行比较,发现脉冲微波处理大米的爆腰率仅为10%,与未处理大米接近(8.5%),显著低于经普通连续微波处理样品(24%)。同时,脉冲微波处理大米蒸煮后,米饭的形态、色泽、香气和口感等感官品质与未处理大米相比无显著性差异,各项指标的得分上均优于普通连续微波处理大米。

2.4 杀青

杀青是农产品加工中的重要环节,其主要目的是破坏或抑制农产品中酶的活性,以延缓下一加工环节(如揉捻、干燥和冷藏等)的酶促生理变化,尽可能保持原有的色、香、味、形和营养成分。此外,杀青还兼具调控物料质构和降低微生物污染等作用。

微波杀青在茶叶加工中的应用最为广泛,不仅能清洁、快速地加热鲜叶,使之质地变软后便于揉捻并挥发青臭味,还有利于茶叶活性成分的保留。刘春杏等^[38]以有效成分含量和感官评价等为指标,研究微波、蒸汽、漂烫及炒青等不同杀青方式对山楂叶茶品质的影响,发现微波杀青的山楂叶茶不仅外形、滋味、汤色和叶底均表现较好,感官审评分数达92.9,而且蛋白质、黄酮和水浸出物含量分别也是最高的。林雨馨等^[39]比较微波、炒制和蒸汽3种杀青方式处理枇杷花茶,发现微波杀青的枇杷花茶黄酮、总酚、三萜酸等功能成分含量和总抗氧化能力高于其他两种杀青方式,同时其成品冲泡形态匀整,香气浓郁纯正。何

守峰等^[40]比较分析漂烫、蒸汽和微波等杀青方式对金花茶鲜叶中主要活性成分的影响,认为漂烫杀青对叶绿素和茶多酚的破坏非常大,蒸汽杀青茶叶的黄酮含量最低,而采用微波杀青的茶叶中各活性成分含量均为最高。微波杀青工艺除能保留茶叶的功能成分外,对其外观也存在显著影响。滑金杰等^[41]发现微波杀青时间和含水率均对茶叶的色差值和相对长度差等外观指标影响显著,微波杀青 60—90 s 可获得较优的外观属性。

除茶叶外,微波也被应用于食用菌杀青。罗晓莉等^[42]研究表明,随着微波杀青时间的延长,榆黄菇、鸡腿菇、鸡枞和青头菌 4 种食用菌超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶和多酚氧化酶的酶活力都迅速下降,杀青 2 min 时可实现上述 4 种酶的钝化。然而,过高的微波功率和过长的微波处理时间都会破坏食用菌的营养成分。王宝刚等^[43]研究发现,随着微波功率增加和杀青时间延长,杏鲍菇的总糖、粗蛋白、粗多糖、粗脂肪和氨基酸等各项指标均呈下降趋势。

对于蔬菜而言,杀青是有效减轻贮藏和干燥过程中酶促劣变(如褐变和活性成分损失等)的预处理手段。工业上常规的杀青方式为热水漂烫,但存在能效低、用水量大和水溶性营养物质流失严重等明显弊端。作为一种清洁高效的干法漂烫技术,微波杀青吸引了越来越多的关注。蔡佳昂等^[44]发现微波处理能够有效抑制鲜切山药中褐变相关的多酚氧化酶与过氧化物酶的活性,从而延缓整体褐变速度。其中,微波功率对鲜切山药护色效果存在较大影响,功率过小会导致护色效果不显著,功率过大则会引起严重的失水。当微波功率为 300 W、处理时间为 80 s 时保鲜效果最佳,不仅能很好地维持鲜切山药的色泽,且贮藏保鲜期可延长到 15 d。Liu 等^[45]发现微波杀青前处理紫肉甘薯块可以改善干燥过程,在缩短干燥时间的同时保持干制品中花青素的含量,但与热水漂烫和蒸汽漂烫处理产品相比,经微波杀青处理产品的色泽较差。

2.5 烹饪

微波烹饪是利用微波的热效应使食材熟化的烹饪方式。与传统的烹饪方式相比,微波烹饪因耗时短、清洁卫生、操作方便、温度和时间可控制度较高而备受青睐。因此,关于微波烹饪对食物的口感、颜色及营养成分等方面的影响研究也日趋丰富。

Zeb 等^[46]研究发现,随微波烹饪时间的增加,菊苣叶中的总酚含量和总黄酮含量显著增加,自由基清

除活性增加或保持不变,色素含量降低,微波烹饪增加了菊苣叶中对人体健康有利的生物活性物质含量。陈景秋等^[47]发现炒和油炸导致紫甘蓝抗氧化物质含量、抗氧化活性显著降低,而汽蒸和微波保留得最多,是烹饪紫甘蓝的较优方式。

然而,虽然微波烹饪在营养成分的保留方面具有优势,但也存在一些缺点。Lakshmi 等^[48]对微波和电饭锅蒸煮米饭进行比较研究,发现虽然微波烹饪所需时间更短,且米饭的水分分布更均匀,但能量利用率要低于电饭锅。另外,有研究表明微波烹饪的米饭和馒头口感较差^[49,50]。

2.6 其他

除上述应用外,微波技术在农产品加工领域的应用还包括有效成分提取、水分含量和品质检测等。Liu 等^[51]发现两级输入功率微波萃取可提高蓝莓粉中花青素的提取率,且降解率较低。顾颖等^[52]设计一套基于微波的大米水分检测系统,并建立微波电压值、大米温度值与粮食水分含有率之间的回归模型,该装置可实现大米水分的快速、无损检测。刘媛等^[53]通过测量微波的介电参数来获得椰子水的蔗糖含量与介电特性的关系,并利用椰子水-蔗糖溶液的导电率与蔗糖质量浓度的依存关系,进一步判断椰子的相对成熟度。

3 展望

微波技术应用于农产品加工领域的相关基础研究和应用基础研究已经取得了大量可喜的成果,并已进入工业化生产阶段。到目前为止,国内外已有众多不同类型的农产品加工微波设备进入市场。然而,微波技术从实验室进入规模化加工阶段时,一些固有性质也会产生不利影响。

首先,微波作用存在空间不均匀性,导致物料中往往存在“过热点”和“过冷点”,影响加工效果的均匀性。这一效应在规模化加工中尤为突出,不仅是由于微波场本身存在不均匀性,而且农产品形态、尺寸和质构的异质性也进一步放大了这一问题,导致规模化微波加工效果的可靠性和稳定性难以达到要求,且大大制约了技术的标准化。为此,一方面可通过优化微波加工设备的设计来改善微波场的均匀性,并增加物料的转动、翻动和移动来改善微波能吸收的均匀性;另一方面,可以结合热风、喷射流^[54]等加快热传导的技术手段来减少微波作用的不均匀性。除此之外,提高对物料的均一性要求,开发适合微波加工的专用农

产品品种也是潜在的解决方案之一。

其次,目前微波加工设备的造价仍相对较高,难以进入中小企业尤其是农村和乡镇企业,进而限制了产地化加工。为此,除进一步降低设备成本尤其是核心部件的成本外,应开发多功能、模块化的微波加工设备,以适应不同季节、原料以及不同用途、加工规模的需求。通过提高设备的通用性和利用率,间接达到降低设备成本的目的。

微波技术具有高效、节能、清洁和易于控制等独特优点,在干燥、灭菌、杀虫、杀青和烹饪等多个农产品加工领域发挥良好的效果,并越来越受到认可和重视。随着现有问题的逐步解决,微波技术在农产品加工领域必将占据更加重要的地位,为推进农业供给侧结构性改革发挥更大的作用。

参考文献

- [1] 李星,欧秀琼,布丽君,等.微波杀菌温度对卤鹅杀菌效果的影响[J].食品工业,2016,37(6):118-120.
- [2] KUBO M T K,CURET S,AUGUSTO P E D, et al. Multiphysics modeling of microwave processing for enzyme inactivation in fruit juices [J]. Journal of Food Engineering,2019,263:366-379.
- [3] 陈智斌,吴树会,夏列,等.微波防治大米中玉米象虫卵的效果研究[J].粮食与油脂,2017,30(6):69-71.
- [4] VENKATESH M S,RAGHAVAN G S V. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials [J]. Biosystems Engineering,2004,88(1):1-18.
- [5] 郭全友,王晓晋,姜朝军.微波杀灭虾源地衣芽孢杆菌孢子特性及效果[J].农业工程学报,2018,34(21):281-287.
- [6] 李明霞,韩建群,王琦,等.低强度微波处理对猕猴桃细胞壁降解酶活性的影响[J].食品与发酵工业,2015,41(11):52-58.
- [7] 何雨婷,郭艳明,张林玉,等.低功率微波处理对香菇采后生理及品质的影响[J].食品工业科技,2016,37(10):338-341.
- [8] 陈孟雅,鲁加惠,张海伟.低能微波预处理对巨峰葡萄贮藏品质的影响[J].食品与机械,2018,34(3):142-145.
- [9] OLSEN C M. Microwaves inhibit bread mold [J]. Food Engineering,1965,37(7):51-53.
- [10] KUBO M T,SIGUEMOTO É S,FUNCIA E S, et al. Non-thermal effects of microwave and ohmic processing on microbial and enzyme inactivation: A critical review [J]. Current Opinion in Food Science,2020,35:36-48.
- [11] CUCCURULLO G,METALLO A,CORONA O, et al. Comparing different processing methods in apple slice drying. Part 1. Performance of microwave, hot air and hybrid methods at constant temperatures [J]. Biosystems Engineering,2019,188:331-344.
- [12] GONG X,HUANG X,YANG T, et al. Effect of drying methods on physicochemical properties and antioxidant activities of okra pods [J]. Journal of Food Processing Preservation,2019,43(12):e14277.
- [13] 江宁,刘春泉,李大婧,等.不同干燥方法对杏鲍菇片品质和能耗的影响[J].江苏农业科学,2014,42(9):232-235.
- [14] 马林强,慕松,李明滨,等.枸杞的微波干燥特性及其对品质的影响[J].农机化研究,2015(5):208-211.
- [15] 王红利,郁志芳.不同干燥方式对甘蓝理化性质和抗氧化活性的影响[J/OL].食品工业科技:1-10. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200427.1856.012.html.
- [16] DONG Q Y,HE D J,NI X D, et al. Comparative study on phenolic compounds, triterpenoids, and antioxidant activity of *Ganoderma lucidum* affected by different drying methods [J]. Journal of Food Measurement and Characterization,2019,13(4):3198-3205.
- [17] 朱新焰,丛琨,石亚娜,等.不同初加工方法对黄精品质的影响研究[J].中国药房,2019,30(18):2537-2541.
- [18] WANG R,ZHANG M,MUJUMDAR A S. Effects of vacuum and microwave freeze drying on microstructure and quality of potato slices [J]. Journal of Food Engineering,2010,101(2):131-139.
- [19] LECHATANSKA J M,SZADZINSKA J,KOWALSKI S J. Microwave- and infrared-assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations [J]. Chemical Engineering and Processing,2015,98:155-164.
- [20] BENLLOCH-TINOCO M,PINA-PÉREZ M C, MARTÍNEZ-NAVARRETE N, et al. *Listeria monocytogenes*, inactivation kinetics under microwave and conventional thermal processing in a kiwifruit puree [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies,2014,22:131-136. DOI:10.1016/j.ifset.2014.01.005.
- [21] 靳志强,王顺喜.微波、紫外线与臭氧组合技术对霉菌及其毒素的协同影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(4):147-154.
- [22] MENDES-OLIVEIRA G,DEERING A J,SAN MARTIN-GONZALEZ M F, et al. Microwave pasteurization of apple juice: Modeling the inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* Typhimurium at 80—

- 90°C [J]. *Food Microbiology*, 2020, 87: 103382.
- [23] EDYTA M P, KLAUDIA K, KATARZYNA S, et al. Microwave heat treatment application to pasteurization of human milk [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 42-48.
- [24] YANG L V, HU G, LIANG J, et al. Study on microwave sterilization technology of humidifier in central air conditioning system [J]. *Building and Environment*, 2019, 160: 106220.
- [25] BANANA A A S, NORULAINI N A N, BAHAROM J, et al. Inactivation of pathogenic micro-organisms in hospital waste using a microwave [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2013, 15(3): 393-403.
- [26] 苏东民, 赵晓琳, 林江涛. 微波对小麦粉中蜡样芽孢杆菌的杀菌效果[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(4): 234-238, 246.
- [27] 彭凯, 吴薇, 李丽, 等. 微波杀灭玉米霉菌的工艺优化及品质分析[J]. *饲料工业*, 2016, 37(11): 59-64.
- [28] XU C, GAO S, WU C, et al. Yeast antagonist and microwave treatment control blue mold rots of harvested jujube fruits [J]. *Plant Omics*, 2015, 8: 517-522.
- [29] SISQUELLA M, VIÑAS I, TEIXIDÓ N, et al. Continuous microwave treatment to control postharvest brown rot in stone fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2013, 86: 1-7.
- [30] KARABULUT O A, BAYKAL N. Evaluation of the use of microwave power for the control of postharvest diseases of peaches [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2002, 26(1): 237-240.
- [31] ZHANG H, FU C, ZHENG X, et al. Control of postharvest *Rhizopus* rot of peach by microwave treatment and yeast antagonist [J]. *European Food Research and Technology*, 2004, 218: 568-572.
- [32] 刘杰, 陈玉麒, 舒在习, 等. 微波处理大米品质指标检测[J]. *粮油食品科技*, 2013, 21(5): 52-55.
- [33] PATIL H, SHEJALE K P, JABARAJ R, et al. Disinfestation of red flour beetle (*Tribolium castaneum*) present in almonds (*Prunus dulcis*) using microwave heating and evaluation of quality and shelf life of almonds [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2020, 87: 101616.
- [34] GAMAGE T V, SANGUANSRI P, SWIERGON P, et al. Continuous combined microwave and hot air treatment of apples for fruit fly (*Bactrocera tryoni* and *B. jarvisi*) disinfestation [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 29: 261-270.
- [35] GUNASEKARAN S, YANG H. Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(4): 1452-1456.
- [36] 曾淑薇, 车丽, 黄琪琳, 等. 大米脉冲微波杀虫防霉工艺优化[J]. *华中农业大学学报*, 2015, 34(2): 106-112.
- [37] 胡婷, 樊明聪, 车丽, 等. 脉冲微波处理对大米理化指标和流变特性的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2016, 35(4): 100-105.
- [38] 刘春杏, 李坤, 朱传合. 不同杀青工艺对山楂叶茶品质的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2017, 35(2): 70-79.
- [39] 林雨馨, 宋建颖, 李杭飞, 等. 不同杀青工艺对枇杷花茶主要成分的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(10): 79-85.
- [40] 何守峰, 吴兰, 段鹏飞, 等. 金花茶鲜叶的杀青技术研究[J]. *中国野生植物资源*, 2018, 37(6): 8-12.
- [41] 滑金杰, 袁海波, 王近近, 等. 微波杀青对茶在制品物理特性影响的初探[J]. *茶叶科学*, 2017, 37(5): 476-482.
- [42] 罗晓莉, 张沙沙. 微波杀青时间对4种食用菌酶活性的影响[J]. *农产品加工*, 2019(5): 31-33.
- [43] 王宝刚, 汪金萍, 黎星辰, 等. 不同微波杀青条件对杏鲍菇营养成分的影响[J]. *食品工业*, 2016, 37(9): 132-135.
- [44] 蔡佳昂, 匡世瑶, 张敏. 微波对鲜切山药护色及品质的保持[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(19): 138-143.
- [45] LIU P, MUJUMDAR A S, ZHANG M, et al. Comparison of three blanching treatments on the color and anthocyanin level of the microwave-assisted spouted bed drying of purple flesh sweet potato [J]. *Drying Technology*, 2015, 33(1): 66-71.
- [46] ZEB A, HAQ A, MURKOVIC M. Effects of microwave cooking on carotenoids, phenolic compounds and antioxidant activity of *Cichorium intybus* L. (chicory) leaves [J]. *European Food Research and Technology*, 2019, 245(2): 365-374.
- [47] 陈景秋, 陈士国, 傅丽, 等. 中式烹饪对紫甘蓝的抗氧化物质和抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(2): 136-144.
- [48] LAKSHMI S, CHAKKARAVARTHI A, SUBRAMANIAN R, et al. Energy consumption in microwave cooking of rice and its comparison with other domestic appliances [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(2): 715-722.
- [49] 周小理, 王惠, 周一鸣, 等. 不同烹煮方式对米饭食味品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 75-80.
- [50] 韩文芳, 王欢欢, 孔进喜, 等. 馒头的微波烹制工艺与特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(6): 79-82.

- [51] LIU C, XUE H, SHEN L, et al. Improvement of anthocyanins rate of blueberry powder under variable power of microwave extraction [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 226: 286-298.
- [52] 顾颖, 张世庆, 蔡健荣, 等. 基于微波的大米水分快速检测研究[J]. 食品科技, 2015, 40(6): 318-321.
- [53] 刘媛, 高艳艳, 杨曼, 等. 椰子的成熟度和贮藏品质的介电评估方法[J]. 食品科学, 2016, 37(14): 225-230.
- [54] CAO X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Evaluation of quality properties and water mobility in vacuum microwave-dried carrot slices using pulse-spouted bed with hot air [J]. Drying Technology, 2019, 37(9): 1087-1096.

Application of Microwave Technology in Processing of Agro-Products: A Review

HUANG Jimin, LI Bingzheng, SHI Deqiang, HUANG Zhimin

(State Key Laboratory of Non-Food Biomass and Enzyme Technology, National Engineering Research Center for Non-Food Biorefinery, Guangxi Key Laboratory of Biorefinery, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

Abstract: Microwave technology has been widely used in agro-products processing due to its notable advantages such as high-efficiency, energy saving, cleanness and controllability. In this article, the application research progress of microwave technology in the fields of drying, sterilization, deinfestation, blanching and cooking, etc. was reviewed. The advantages and disadvantages of microwave technology when applied to the above aspects were also briefly analyzed. Finally, the existing problems of microwave technology were pointed out, and some suggestions for its future development were also given.

Key words: microwave, agro-products, drying, sterilization, cooking

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkxyxb/ch>