

国外射频波农产品产后虫害控制的研究进展

施火结^{1,2} 张绍英^{1*} 郑文鑫¹

(1. 中国农业大学 工学院,北京 100083;

2. 福建农林大学 机电工程学院,福州 350002)

摘要 虫害导致的农产品储藏损失率很高。化学熏蒸杀虫易产生环境污染和毒素残留,安全性较差,而射线辐照杀虫引起品质劣变。射频技术作为一项新的技术,因独特的选择性加热和高穿透力等优势,将广泛应用于传热困难、热敏性农产品的产后虫害控制领域。综述目前国外在这方面的研究进展,重点介绍存在的问题。最后,分析国内开展该技术研究的重要性和迫切性,并对今后的研究方向提出建议。

关键词 农产品储藏;射频杀虫;介电特性;加热均匀性

中图分类号 S 129

文章编号 1007-4333(2014)05-0197-06

文献标志码 A

Review of radio frequency treatment for post-harvest pest control on agro-product

SHI Huo-jie^{1,2}, ZHANG Shao-ying^{1*}, ZHENG Wen-xin¹

(1. College of Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China;

2. School of Mechatronics, Fujian A & F University, Fuzhou 350002, China)

Abstract A major problem in agro-product storage is the infestation of insect pests. Present quarantine treatments for domestic markets include chemical fumigation and ionizing radiation. The need to replace those methods becomes more urgent because of concerns about the health hazards of chemical pesticides and its environment pollution. An innovative technique using radio frequency (RF) heating can extend storage with low cost and good quality of agro-product, especially for those with low heat transfer coefficient and its quality susceptible to heat. The objectives of this review were firstly to introduce the recent advances on the post-harvest pest control of agro-product abroad, then to analyze the existing problems in particular and finally to prospect a tendency and significance of possible practical application of RF treatment for agro-product insect control in China.

Key words agro-product storage; radio frequency heating; dielectric properties; temperature uniformity

射频(Radio frequency,简称 RF)是频率在 3~300 MHz 范围内的电磁波。在一定强度电磁场的作用下,农产品中的害虫、虫卵和食品中微生物会因分子极化现象,吸收电磁波而升温,使其蛋白质热变性,从而失去生物活性。具有合适波长的电磁波能穿透到物料内部,使极性物料通体发热,具有快热、低能耗、选择性加热和含水率自平衡效应等优点,特别适用于导热不良和热敏性农产品和食品低温环境

下的杀虫、灭菌。相比微波加热,RF 加热能量穿透深度大、设备投资小,同时,RF 场比微波场的电磁场强均匀。因此,RF 技术在农产品干燥、杀虫以及粉末、多孔物料的灭菌及食品解冻等领域具有很大的发展潜力。

自 20 世纪中后期始,国内外对 RF 杀虫机理、杀虫工艺条件进行了探索性研究,并尝试应用于坚果、柑橘等食品的储藏前杀虫、灭菌,以减少储藏损

收稿日期:2014-01-09

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD31B09)

第一作者:施火结,博士研究生,E-mail:shj_fjau@163.com

通讯作者:张绍英,教授,博士生导师,主要从事农产品和食品加工技术及装备研究,E-mail:cauzsy@cau.edu.cn

失,延长货架期。近些年来,国外在这方面主要的研究热点集中在 RF 环境中害虫致死机理、原料及害虫的介电特性及能量转化/传递特性、RF 场能量分布控制和原料温度调控等领域。我国对农产品和食品 RF 技术应用的研究很少。20 世纪 70—80 年代鞍山市粮食局第二粮库和鞍山钢铁大学科研组以及徐立分别在粮食、茶砖干燥中做了研究^[1-2]。直到近年,张丽^[3]进行红枣的 RF 热风联合干燥试验研究;王云阳^[4]进行澳洲坚果 RF 干燥研究;刘嫣红等^[5]研究了 RF 联合热风处理袋装面包。截至目前为止,RF 技术在农产品产后害虫控制方面的应用,国内未见公开报道。本研究试图全面、深入地介绍国外农产品产后 RF 波能虫害控制的研究现状及存在问题,为国内从事相关研究的人员提供参考和借鉴,共同促进我国在该方面研究的发展。

1 RF 波农产品产后杀虫的研究进展

在农产品储藏中,虫害引起的损失率很高,传统的杀虫方法——化学熏蒸防治法危害环境和人体健康,电离辐照投资大,放射线对人体和农产品有影响。由于农产品的介电特性远低于害虫,因此电磁场对害虫具有优先加热效应。RF 技术为杀灭农产品害虫,提高贮藏性提供了新的技术途径。早前研究表明用 RF 波对农产品杀虫的可能性^[6-7]。

自 2000 年以来,国外研究人员做了大量相关研究。Tang^[8]等建立了一个揭示害虫热致死机理的动力学模型,该模型表明了“高温短时”热处理水果小卷蛾(Codling Moth)的潜在价值。2003 年,Wang 等^[9-10]深入地分析了果品和害虫在 RF 和微波处理时的介电特性,该研究选择了一些果品和幼虫进行试验,发现害虫在 RF 处理时的介电损耗因数明显比果品大,说明了用 RF 处理果品时,其中的害虫有可能被更快地加热。

在鲜果杀虫方面,Birla 等^[11]做了橙子地中海实蝇 RF 处理的试验,并在 4 °C 温度下储藏 10 d 后对橙子的品质,如重量、硬度、颜色、可溶性固形物(Soluble solids)、酸度和易挥发性物质进行了检测。结果跟传统热水处理比较,以上品质未见明显变化,且 RF 处理对易挥发性物质保留效果更好。Wang 等^[12]采用 RF-热水浴方法对苹果进行杀虫处理。苹果先经过 45 °C 温水预处理 30 min,再由 RF 加热到 48 °C,停止 RF 加热并在 48 °C 的热水中分别保持 5、10、15 和 20 min,冰水冷却 30 min,然后在 4 °C

的条件下储藏 0、7 和 30 d,测量苹果的品质以及虫害情况。结果表明:48 °C 的热水保持 15 min 效果最好。在文献[13]中,同样采用了 RF-热水浴方法对芒果进行杀虫处理。芒果先经过 45 °C 温水预处理 50 min,然后 RF 加热 1 min 到 48 °C,再把芒果放到 48 °C 的热水中保持 6 min 以上。结果表明:该处理效果可达到美国农业部动植物防疫检疫局的要求。类似的研究中对“嘎啦”、“福吉”鲜苹果^[14-15]、“冰”甜樱桃^[16-17]、“福余”柿子^[18]的处理效果均得到相同的结论。但就目前的研究来看,RF 加热技术在鲜果杀虫领域应用优势不大,原因一方面是处理成本较高,另一方面鲜果加热处理过程易产生热害。

在干果杀虫方面,Wang 等^[19]在 2001 年研究发现,采用 RF 处理核桃时,其中心温度从 20 °C 升至 53 °C 时,害虫的温度可升至 65.6~74.2 °C。在不损害核桃品质的情况下,可在较低的物料温度和较短的时间内获得满意的杀虫效果。在 2002 年,进行了胡桃^[20]的 RF 试验(RF 系统配置为:27 MHz, 12 kW),物料温度升至害虫致死温度(<55 °C)时,被认为是最顽疾害虫之一的第五龄脐橙螟(Navel Orangeworm, Amyelois Transitella[Walker])的致死率可达 100%。在 2010 年,对鹰嘴豆(Chickpea)、绿豆(Green pea)和小扁豆(Lentil)等豆科植物进行的 RF 热处理^[21]试验发现,5~7 min 便可使 3 kg 豆科植物中心温度达到 60 °C,而相同条件下热风需要 275 min。采用 RF 联合热风在 60 °C 保持 10 min 通入自然风后,豆科植物的重量、水分、颜色等没有明显变化。

在 2013 年进行的理论计算表明,以 5 和 10 °C/min 的加热速率对杏仁进行 RF 加热时,杏仁中的脐橙螟的升温幅度可比杏仁分别高出 4.7 和 6.0 °C^[22],并用与脐橙螟介电损耗因数一样的结冷胶(Gellan gum)作为试验对象验证了理论模型。以上研究充分表明,RF 加热技术在坚果、干果及稻谷^[23]虫害控制方面具有广阔的应用前景。

2 农产品 RF 杀虫存在的问题

2.1 害虫热致死动力学问题

截止目前,有关农产品 RF 杀虫的研究均针对特定的产品和特定的害虫,不能用来预测所有害虫热致死动力学参数,也未涉及 RF 加热、RF-热风和 RF-热水加热方式下杀灭害虫的最优加热速率、最

优温度和加热时间。因此,建立适用不同热杀虫方式的害虫热致死动力学模型具有非常重要的意义。从基础和系统的角度出发所建立的有效动力学模型,不仅能用于预测不同加热速率、加热温度和时间下的害虫死亡率,而且还能比较不同虫龄和害虫之间的耐热性,更重要的是,依据农产品 RF 加热的瞬时加热曲线所预测害虫的死亡率,可进一步优化加热过程。此外,关于害虫耐热机理、热抗性、降低氧浓度或提高二氧化碳浓度对热杀虫的增效作用等有待深入探索。

2.2 加热均匀性问题

在理论和实践上 RF 处理对钝化害虫的有效性已充分显现,但当 RF 处理工艺、参数选择不当时,杀虫量不能达到既定要求,且会对农产品外观和内部品质造成不同程度的破坏。如 RF 处理不当时鲜果会出现变色、蚀损斑、灼伤等^[11]。其中的主要原因,一是加热速率、加热时间和加热温度等加热参数对原料的综合影响机制和规律尚不明确;二是 RF 加热系统存在多种原因导致的加热不均匀性问题。物料在 RF 场中的加热模式受到多种因素影响,既包括物料介电特性、形状、大小、相对极板的位置,还涉及 RF 系统的极板电压、结构等,与微波加热一样,加热不均匀属于 RF 加热固有的、致命性缺陷。Mitcham 等^[24]研究发现,胡桃中水分含量是热均匀性的关键因素,原因是充足的水分可使离子均布,统一极化、整体升温。为提高 RF 加热的均匀性,Wang 等^[12,25]研制了一台采用射水驱动柑橘和苹果旋转的试验装置,测试结果表明,水果的外形影响加热模式,带凹坑椭球状苹果比接近球形橙子的温度分布变化大,但苹果的旋转和移动降低了 RF 场的不均匀性和苹果形状的不规则引起的负面影响,改善了热均匀性。文献^[26]将樱桃放置在 0.15% 的盐水浴中进行 RF 处理,改善了樱桃 RF 加热的均匀性,实现了小卷蛾和虫卵的 99% 杀虫率,同时樱桃品质不受影响。采用盐水的原因是由于盐水的介电损耗因数比水更接近樱桃,这样可使得进入樱桃的电磁场分布更均匀。

对于农产品 RF 加热的均匀性研究,通常还采用 RF-循环热风处理的方法。在鹰嘴豆、绿豆和小扁豆等豆科植物 RF 处理时,通过速度为 0.56 m/min 的传送带和热风联合作用,可以达到较满意的 RF 加热均匀性^[21]。在咖啡豆的 RF-循环热风的处理中^[27],传送带的速度为 0.89 m/min 时加热均匀

性较好。此外,采用 RF 间歇激励的方法也可以降低热不均匀性的程度。Wang 等^[28]采用带有多个连续的 RF 激励单元,基于核桃温度对频率的正态分布建立了一个经过试验验证的数学模型,以研究 RF 单元的数量和间歇激励对热均匀性的影响,结果表明,尽管静止的带壳核桃方向和位置不同,不能消除不均匀性,但可通过优化 RF 的激励方式来最大程度降低位置效应,提高加热均匀性。

近年来,随着计算机软硬件水平的提高,基于电磁-热场耦合分析数值求解方法,开展了 RF 加热仿真分析,旨在揭示农产品 RF 加热机理和提高加热均匀性。Yang 等^[29]对小萝卜和苜蓿种子包装在规则盒子中的 RF 加热处理进行仿真,采用传输线方法(Transmission line method)进行时间步进求解电场的分布,采用标准的时域有限差分法求解物料的热分布。通过种子 RF 热处理的试验验证了仿真中时间-温度的分布。同时也指出,在盒子边缘附近仿真结果与试验验证相互矛盾。Tiwari 等^[30]选择小麦粉作为低水分典型物料进行仿真,结果显示中间层物料温度最高,其次是上下底面层,每层的四周温度都比中间高,分析指出上极板的电压和物料的介电特性是最有可能引起不均匀的原因。Alfaifi 等^[31]建立了方形盒装的葡萄干计算机仿真模型,并试验验证了该模型。仿真和试验均表明了平均温度和标准偏差最高的是中间层,依次为上层、下层。盒子边缘和四角温度最高。经过敏感性分析得出影响加热均匀性的因素依次为葡萄干的密度、上极板电压、介电系数、热导率和传热系数。

在农产品 RF 杀虫加热均匀性的研究上,国外研究人员做了一些有益的工作,针对不同处理对象采取了不同的措施提高加热均匀性,但降低了加工效率和能源利用率,因此在该方面的研究任重道远。对于 RF 加热过程的理论分析、试验研究和模拟工作仍有待进一步加强,这有助于揭示 RF 加热机理,准确把握加热过程中物料内部的温度分布,从而优化工艺过程,提高 RF 加热均匀性及加工效率。

2.3 农产品介电特性研究现状

介电特性是指电介质中的束缚电荷对外加电场的响应特性。介电特性可表现物料对静电能的储蓄和损耗的性质,通常用介电常数和介质损耗因数组成的复介电系数来表示。介电特性对于研究农产品和食品 RF 加热规律具有重要意义。在对一些农产品及害虫,如葡萄干、海枣、杏仁、无花果和西梅

干^[32]、澳洲坚果^[33]、红花籽^[34]、黑目豆和绿豆虫^[35]以及板栗和栗实象甲^[36]的介电系数的测量发现:农产品和害虫的含水率对介电系数的影响最大;频率和容积密度对介电系数的影响很大。介电常数随温度、含水率或容积密度的增大而增大,但随频率的增大而减小。在RF段(10~300 MHz)介电损耗因数随频率增加而快速降低;在微波段(300~1 800 MHz)则随频率增加逐渐减小,随温度的增加急剧增加,随含水率或水活度的增加而增加。穿透深度均随频率、含水率和温度的增加而减小。

国外常用的介电特性测试仪器主要是网络分析仪或阻抗分析仪,这些仪器对被测物料的形状、物态均有较严格的要求,物料状态偏离仪器的测量规范时结果很难真正反映物料本身的介电特性。另外,低频段的界面极化对测试结果有较严重的影响。由于受测试技术的限制,农产品介电特性的研究较少,已有研究中测量范围仅涉及有限的几种含水率、温度和频率。农产品的介电特性受频率、温度、含水率、密度(浓度)、盐度、糖度和化学成分(脂肪、蛋白、碳水化合物)等多重因素综合影响,规律极其复杂。目前,尚未能对这些影响因素作深入、全面的分析,且介电系数与RF电磁场的相互作用机理,介电系数对RF加热速率和加热均匀性的影响规律尚未完全解开,一定程度上制约了农产品RF杀虫的研究进展。

2.4 工业化应用的问题

RF技术作为一种新型的农产品和食品热处理技术,目前的商业化应用主要局限于焙烤制品的焙后干燥,由于技术和成本两方面原因尚未广泛应用于工业生产。研究表明,RF热加工的产品品质相当于或高于传统热加工产品,但大部分研究目前仅停留在试验阶段。在农产品产后杀虫工业化应用的研究中,RF技术展现出诱人前景,但相关研究不多且多处于中试阶段。

Wang等^[37]提出了采用RF对胡桃进行产后杀虫的工业化应用方案,系统功率12 kW,处理能力4 540 kg/h,连续作业。同时,提出的方案还考虑诸如胡桃方向、开口和闭合的胡桃受热差别、实际的储藏期和耗能等影响因素。RF用于胡桃产后杀虫的突出问题,一是相比传统熏蒸高耗能带来的高处理成本,二是加热均匀性不好导致的产品品质可控性差^[38]。研究还发现,RF处理主要引起胡桃垂直方向上温度分布不均,RF-循环热风处理可改善加热

均匀性。Wang等^[39]还做了带壳胡桃工业化RF杀虫在杀虫效果和胡桃品质方面的研究。胡桃经25 kW,27 MHz的RF系统加热到表面60℃、最低温度52℃时,保持5 min可保证第五龄脐橙螟全部杀死。RF处理后35℃下贮藏20 d相当于4℃下贮藏2年,此时的核仁颜色、过氧化物和脂肪酸均未发生明显改变。该研究条件下,耗电成本为0.002 7 USD/kg(以0.1 USD/(kW·h)计),而采用溴甲烷(Methyl Bromide)熏蒸时,熏蒸剂成本为0.002 7 USD/kg(批量34 t,溴甲烷以2005年售价9.7 USD/kg计)。

此外,Jiao等^[40]研究了小扁豆RF杀虫的工业化应用。当加工能力为208.7 kg/h时,生产效能可达76.5%。当传动带速为7.5 m/h、采用6 kW、27 MHz的RF-循环热风将小扁豆加热到60℃保持10 min,再通入自然风冷却20 min,可使小扁豆中的绿豆虫杀死率达到100%。处理后小扁豆的含水率、颜色和萌芽等品质在可接受范围内。

上述研究表明RF杀虫具有广阔的应用领域。对于低成本的化学熏蒸等传统杀虫方法而言,RF杀虫的突出优势主要表现为环保、便于控制、产品品质好等方面,具有潜在的工业化应用价值。目前,RF杀虫的理论及技术体系尚不完善,实现工业化应用还面临不少问题。

3 我国开展农产品RF杀虫的重要性及建议

在国外,对农产品RF处理中害虫热致死机理研究已有多年经验并取得一定的创新成果。但国内有关农产品RF杀虫技术的研究鲜见报道。鉴于射线辐照杀虫方法引起品质劣变;化学熏蒸杀虫易产生环境污染、毒素残留和安全性较差,以及化学熏蒸产品易受到贸易限制等问题,1997年9月《蒙特利尔议定书》哥本哈根修正案规定,美国等发达国家在2005年逐步限制以至禁止使用溴化甲烷,中国等发展中国家则要在2015年停止使用^[41]。此外,化学熏蒸剂使用成本的增加等这些方面的原因,使得化学灭虫方法遇到了越来越多的困难和挑战。由此可见,探索环保、安全、高效的农产品产后杀虫方法显得极为迫切和重要。

目前,借助国际上商业化的RF热处理系统以及红外热成像照相机、光纤热传感器、介电特性测量系统和计算机仿真技术等辅助工具与测量技术手段,我国RF杀虫技术的研究可以从以下几个方面

展开:

- 农产品产后害虫 RF 杀灭效果及其对于农产品品质影响的研究;
- 农产品和食品介电特性及其损耗机理的理论探索与介电特性精确测量技术研究;
- RF 加热过程中的能量转化机理及农产品内部的温度分布;
- RF 对农产品害虫生理过程的影响及热致死动力学的研究;
- 大功率、高电压稳定 RF 电源和 RF 加热系统的研究开发。

参 考 文 献

- [1] 鞍山市粮食局第二粮库, 鞍山钢铁大学科研组. 高频介质加热在粮食烘干中的应用[J]. 电子技术应用, 1976, 2(1): 11-22
- [2] 徐立. 论高频介质加热在砖茶干燥工艺中的应用[J]. 茶叶, 1983, 27(1): 37-42
- [3] 张丽. 红枣的 RF 热风联合干制技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010
- [4] 王云阳. 澳洲坚果射频干燥技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012
- [5] 刘嫣红, 唐炬明, 毛志怀, 等. 射频-热风与热风处理保鲜白面包的比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 323-328
- [6] Headlee T J, Burdette R C. Some facts relative to the effect of high frequency radio waves on insect activity[J]. Entomol AM-NY, 1929, 37(1): 59-64
- [7] Nelson S O, Payne J A. RF dielectric heating for pecan weevil control[J]. T Asabe, 1982, 25(2): 456-458
- [8] Tang J, Ikediala J N, Wang S, et al. High-temperature short-time thermal quarantine methods[J]. Postharvest Biol Tec, 2000, 21(1): 129-145
- [9] Wang S, Tang J, Johnson J A, et al. Dielectric properties of fruits and insect pests as related to radio frequency and microwave treatments[J]. Biosyst Eng, 2003, 85(2): 201-212
- [10] Wang Y, Wig T D, Tang J, et al. Sterilization of foodstuffs using radio frequency heating[J]. J Food Sci, 2003, 68(2): 539-544
- [11] Birla S L, Wang S, Tang J, et al. Quality of oranges as influenced by potential radio frequency heat treatments against mediterranean fruit flies[J]. Postharvest Biol Tec, 2005, 38(1): 66-79
- [12] Wang S, Birla S L, Tang J, et al. Postharvest treatment to control codling moth in fresh apples using water assisted radio frequency heating[J]. Postharvest Biol Tec, 2006, 40(1): 89-96
- [13] Sosa-Morales M E, Tiwari G, Wang S, et al. Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes. Part II: Development of RF-based protocols and quality evaluation of treated fruits[J]. Biosyst Eng, 2009, 103(3): 287-296
- [14] Hansen J D, Drake S R, Heidit M L, et al. Radio frequency-hot water dips for postharvest codling moth control in apples[J]. J Food Process Pres, 2006, 30(6): 631-642
- [15] Hansen J D, Drake S R, Watkins, et al. Radio frequency pulse application for heating uniformity in postharvest codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) control of fresh apples (Malus domestica borkh)[J]. J Food Quality, 2006, 29(5): 492-504
- [16] Hansen J D, Drake S R, Heidit M L, et al. Evaluation of radio frequency-hot water treatments for postharvest control of codling moth in 'Bing' sweet cherries[J]. Horttechnology, 2005, 15(3): 613-616
- [17] Monzon M E, Biasi B, Simpson T L, et al. Effect of radio frequency heating as a potential quarantine treatment on the quality of 'Bing' sweet cherry fruit and mortality of codling moth larvae[J]. Postharvest Biol Tec, 2006, 40(2): 197-203
- [18] Monzon M E, Biasi B, Mitcham E J, et al. Effect of radio frequency heating on the quality of Fuyu persimmon fruit as a treatment for control of the Mexican fruit fly[J]. Hortscience, 2007, 42(1): 125-129
- [19] Wang S, Ikediala J N, Tang J, et al. Radio frequency treatments to control codling moth in-shell walnuts [J]. Postharvest Biol Tec, 2001, 22(1): 29-38
- [20] Wang S, Tang J, Johnson J A, et al. Process protocols based on radio frequency energy to control field and storage pests in in-shell walnuts[J]. Postharvest Biol Tec, 2002, 26(3): 265-273
- [21] Wang S, Tiwari G, Jiao S, et al. Developing postharvest disinfestation treatments for legumes using radio frequency energy[J]. Biosyst Eng, 2010, 105(3): 341-349
- [22] Wang S, Tang J, Johnson J A, et al. Heating uniformity and differential heating of insects in almonds associated with radio frequency energy[J]. J Stored Prod Res, 2013, 55(1): 15-20
- [23] Lagunas-Solar M C, Pan Z, Zeng N X, et al. Application of radio frequency power for non-chemical disinfestation of rough rice with full retention of quality attributes[J]. T Asabe, 2007, 23(5): 647-654
- [24] Mitcham E J, Veltman R H, Feng X, et al. Application of radio frequency treatments to control insects in in-shell walnuts[J]. Postharvest Biol Tec, 2004, 33(1): 93-100
- [25] Birla S L, Wang S, Tang J, et al. Improving heating uniformity of fresh fruit in radio frequency treatments for pest control[J]. Postharvest Biol Tec, 2004, 33(2): 205-217
- [26] Ikediala J N, Hansen J D, Tang J, et al. Development of a saline water immersion technique with RF energy as a postharvest treatment against codling moth in cherries[J]. Postharvest Biol Tec, 2002, 24(2): 209-221
- [27] Pan L, Jiao S, Gautz L, et al. Coffee bean heating uniformity and quality as influenced by radio frequency treatments for postharvest disinfestations[J]. T Asabe, 2012, 55(6): 2293-2300

- [28] Wang S, Yue J, Tang J, et al. Mathematical modelling of heating uniformity for in-shell walnuts subjected to radio frequency treatments with intermittent stirrings [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2005, 35(1): 97-107
- [29] Yang J, Zhao Y, Wells J H. Computer simulation of capacitive radio frequency (RF) dielectric heating on vegetable sprout seeds[J]. *J Food Process Eng*, 2003, 26(3): 239-263
- [30] Tiwari G, Wang S, Tang J, et al. Analysis of radio frequency (RF) power distribution in dry food materials[J]. *J Food Eng*, 2011, 105(4): 48-55
- [31] Alfaifi B, Tang J, Jiao Y, et al. Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit; Model development and validation [J]. *J Food Eng*, 2014, 120(1): 268-276
- [32] Alfaifi B, Wang S, Tang J, et al. Radio frequency disinfestation treatments for dried fruit; Dielectric properties[J]. *Lwt-Food Sci Technol*, 2013, 50(2): 746-754
- [33] Wang Y, Zhang L, Gao M, et al. Temperature- and moisture-dependent dielectric properties of macadamia nut kernels[J]. *Food Bioprocess Tech*, 2013, 6(8): 2165-2176
- [34] Sacilik K, Tarimeci C, Colak A. Moisture content and bulk density dependence of dielectric properties of safflower seed in the radio frequency range[J]. *J Food Eng*, 2007, 78(4): 1111-1116
- [35] Jiao S, Johnson J A, Tang J, et al. Dielectric properties of cowpea weevil, black-eyed peas and mung beans with respect to the development of radio frequency heat treatments[J]. *Biosyst Eng*, 2011, 108(3): 280-291
- [36] Guo W, Wu X, Zhu X, et al. Temperature-dependent dielectric properties of chestnut and chestnut weevil from 10 to 4500 MHz[J]. *Biosyst Eng*, 2011, 110(3): 340-347
- [37] Wang S, Tang J, Sun T, et al. Consideration in design of commercial radio frequency treatments for postharvest pest control in in-shell walnuts[J]. *J Food Eng*, 2006, 77(2): 304-312
- [38] Wang S, Monzon M, Johnson J A, et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts I: Heating uniformity and energy efficiency [J]. *Postharvest Biol Tec*, 2007, 45(2): 240-246
- [39] Wang S, Monzon M, Johnson J A, et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in walnuts II: Insect mortality and product quality[J]. *Postharvest Biol Tec*, 2007, 45(2): 247-253
- [40] Jiao S, Johnson J A, Tang J, et al. Industrial-scale radio frequency treatments for insect control in lentils[J]. *J Stored Prod Res*, 2012, 48(1): 143-148
- [41] Rowlands I H. The 4th meeting of the parties to the Montreal Protocol; Report and Reflection. CSERGE Working Paper GEC 93-18[R]. London; London School of Economics and Political Science, 1993

责任编辑: 袁文业