

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.024

射频技术在农产品和食品加工中的应用*

刘嫣红 杨宝玲 毛志怀

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 论述了射频技术的工作原理、特点,及其在农产品和食品加工领域的应用研究现状和存在的主要问题,并提出了该技术在我国的应用前景。射频技术所特有的选择性加热、含水率自平衡效应以及能量穿透深度大等优点,使其在农产品干燥、灭虫,以及粉末、多孔物料的杀菌和热处理领域具有巨大的发展潜力。

关键词: 农产品 食品 射频 干燥 杀虫 灭菌

中图分类号: S124+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)08-0115-06

Radio Frequency Technology and Its Application in Agro-product and Food Processing

Liu Yanhong Yang Baoling Mao Zhihui

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

Radio frequency (RF) technology was introduced. Application prospect of RF in China was proposed. RF heating technology have advantages of selective heating effect, moisture leveling effect and high energy penetration depth, and widely used in agro-product drying, insect control, sterilization and heat treatment of porous food materials.

Key words Agro-product, Food material, Radio frequency, Drying, Insect control, Sterilization

引言

射频(radio frequency,简称RF)是一种高频交流电磁波,其频率范围为3 kHz~300 MHz。射频能穿透到物料内部,引起物料内部带电离子的振荡迁移,将电能转化为热能,从而达到加热的目的^[1]。早在20世纪40年代,国外学者便尝试将射频技术应用用于食品与农产品加工领域,最初是用于加热肉制品、面包和生产脱水蔬菜;20世纪60年代,射频技术在食品加工领域的应用研究集中于冷冻食品的解冻处理,并且投产了若干商业生产线;20世纪80年代末,射频技术成功应用于饼干类焙烤制品的焙后干燥处理,既大大降低了能耗,又提高了产品的品质,这是迄今为止射频技术在食品加工领域最成

功的商业应用^[2-5]。20世纪90年代以来,随着人们食品安全意识的逐步提高,射频技术在农产品和食品杀菌领域的应用成为国际上的研究热点。目前,国际上工业、科研以及医药行业(ISM)常用的3个射频频率分别为13.56、27.12和40.68 MHz^[6]。

射频技术在我国也早有应用,但其应用仅限于轻工业及医药行业,用于木材的干燥胶合^[7]、纺织品的干燥固色^[8]、塑料制品的焊接^[9]以及手术中的局部加热治疗^[10]等,主要利用其选择性加热的特点,处理过程具有高效、快速的优点。而该技术在农产品和食品加工领域的研究,除了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^[11]以及徐立^[12]分别在粮食、茶砖干燥中的研究尝试外,截至目前国内未见其他公开报道,该技术

收稿日期:2009-11-17 修回日期:2010-02-05

* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009JS15)

作者简介:刘嫣红,讲师,博士,主要从事农产品加工工程研究,E-mail:liuyan hong@cau.edu.cn

通讯作者:毛志怀,教授,博士生导师,主要从事农产品加工工程研究,E-mail:maozhh@cau.edu.cn

在我国具有巨大的研究空间和发展潜力。同时,红外热成像照相机、光纤传感器、介电特性测量系统以及计算机模拟技术等辅助工具与技术手段的出现,解决了早期研究中因测量技术手段缺乏而造成的研究无法深入的问题,可大大方便射频技术的研究进程。本文论述射频技术的优缺点及其在农产品和食品加工中的研究现状和存在的问题,由此提出其在我国的应用前景。

1 射频加热系统的工作原理

常用于农产品和食品加工领域的射频加热系统为平行极板式射频加热系统,可以简化为由上、下两极板构成的平行板电容器^[2,4~5],如图1所示。被加热物料置于两极板间,交变电磁场通过极板作用于物料,射频能量(极板边缘杂散电场的作用可忽略)沿垂直极板方向作用于物料。

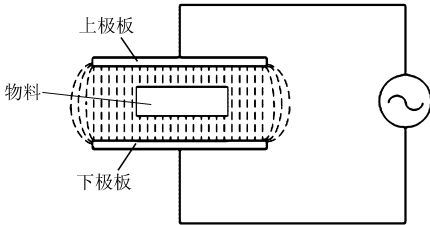


图1 射频加热系统示意图

Fig. 1 Schematic of RF heating system

射频能量穿透至物料中,部分能量被物料吸收,物料温度随之升高。物料介电损耗因子越大,其吸收的射频能量越多。物料在射频场中的升温速率为^[13]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2}{\rho c_p} = \frac{5.56 \times 10^{-11} f \epsilon'' E^2}{\rho c_p}$$

式中 T ——温度, K t ——时间, s

f ——频率, Hz

ϵ_0 ——真空电容率, 8.854×10^{-12} F/m

ϵ'' ——介电损耗因子 E ——电场强度, V/m

ρ ——密度, kg/m^3 c_p ——比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

由公式可知,物料在射频场中的加热速率与频率、物料的介电损耗因子以及电场强度的平方成正比,与物料的密度、比热容成反比。对于给定的射频加热系统,频率和电压是固定的,因此物料的加热速率与介电损耗因子成正比,与物料的密度、比热容以及极板间距的平方成反比。

2 射频技术的优缺点

2.1 优点

2.1.1 与传统加热方式相比

(1) 快速、均匀加热

射频能量可穿透至物料内部,使物料整体内外

同时均匀受热。而传统加热方式下,热量由物料表面逐渐传导至内部,加热过程缓慢,并会出现物料表面温度高于中心温度的现象。

(2) 物料温度低

射频技术可在较低的物料温度和更短的时间内获得满意的杀菌效果^[14]。因此,可以更好地保持产品的品质。

(3) 含水率自平衡效应

由于离子电导损耗随物料含水率的增大而增大^[13,15],随着射频加热过程的进行,物料中局部含水率较大的部分,介电损耗因子较大。同时,由升温速率关系式可知,物料在射频场中的加热速率随物料介电损耗因子的增大而增大,因此射频能量会集中在局部含水率较大的部分,从而确保加热过程物料含水率的均匀性。

2.1.2 与微波加热相比

(1) 能量穿透深度大

电磁波在物料中的穿透深度与其频率成反比,因微波频率(300 MHz ~ 300 GHz)远远高于射频,其对物料的穿透深度远远小于射频^[16]。而当电磁波的穿透深度小于物料厚度的1.5倍时,能量会集中在距离物料表面1倍穿透深度的地方,其边角部分会受到过度加热,称为边角集中效应^[17~18]。由于边角集中效应的存在,以微波加热大块物料的过程中,会出现物料中心部分尚未熟透而边角处已产生焦糊的现象,因此对大块物料进行热处理时,射频优于微波。

(2) 设备投资小

射频发生器的功率最高可达900 kW,而915 MHz微波发生器的功率最高仅为90 kW,2450 MHz微波发生器的功率最高仅为10 kW,因此大型工业微波设备通常采用多个发生器,这难免会增加设备投资。通常,一套工业微波设备的投资约为射频设备的2倍^[19]。

2.2 缺点

2.2.1 热偏移现象

离子电导损耗随温度的升高而增加^[13,15],射频加热过程中,随着温度的升高物料的介电损耗因子逐渐增大,吸收的射频能量随其介电损耗因子的增大而增大。如果物料中存在局部温度较高的部分,则射频加热过程中,能量便会集中在该部分,从而出现局部过热现象,称为热偏移^[5,13]。因此,如果物料的初始温度不均匀或者电磁场分布不均匀,则系统的加热均匀性很难保证。由于射频加热系统电磁场分布比较均匀、简单,并可通过计算机模拟优化其电磁场模式,因此热偏移问题可以得到较好的解决。

2.2.2 应用仅限于工业范围

射频加热过程中,如果物料的形状不规则,则射频能量将集中在物料中厚度最大的部位,即存在尖角效应,导致物料中厚度最大的部位出现过热现象^[1,20]。因此,射频加热系统对物料的几何形状具有严格的要求,物料必须具有规则、简单的几何形状,这就使得射频加热系统不能像微波炉那样走进千家万户。但由于工业产品多为规则的几何形状,农产品加工中也多采用规则形状的容器,因此几何形状的限制并不影响射频技术的工业应用。

3 射频技术在农产品和食品加工中的研究现状

目前,射频加热技术在食品与农产品加工中的应用研究主要围绕以下方面。

3.1 干燥

射频加热技术在食品工业中最成功的应用是饼干类焙烤制品的焙后干燥,目前已经有非常成功的商业化生产的机型,比如英国 Strayfield Fastran 公司已先后生产出了 16 种射频焙后干燥机。

3.2 杀菌

刘嫣红、Wang、Luechapattanaporn、Orsat 等对于袋装切片面包、乳酪通心粉、炒鸡蛋、火腿的射频杀菌研究表明,射频可以有效杀灭物料中的微生物孢子,从而有效延长物料的保质期^[14,21-25]。对袋装切片面包进行射频、热风联合处理,其加热速率约为传统热风处理的 30 倍,当面包冷点温度高于 58℃ 时,面包中的桔青霉孢子数可以降低 4 个数量级;而传统加热方式下,青霉的热致死条件为 68~70℃ 下加热 20 min^[14]。对乳酪通心粉进行射频处理,30 min 后即可获得满意的杀菌效果,而采用传统杀菌方式达到同样的杀菌效果需时 90 min,同时食物的品质可以获得更好的保持^[21]。经射频、热风联合处理后,袋装切片染菌白面包的保存期可以延长 34 d ± 2 d^[14]。经射频处理并采用高阻隔材料包装后,火腿的保质期可延长至 28 d^[24]。

3.3 蒸煮(烹制)

Tang 等研究了牛肉、火鸡肉的射频蒸煮过程^[25-26]。将牛腱子肉和火鸡胸肉定型包装(直径 96 mm)后,浸入 80℃ 的循环水中,通过射频加热至其冷点温度达到 73℃ 并保持 2 min,射频、循环水联合加热时间仅为传统蒸汽加热时间的 23%~31%,感官评定结果表明,两种加热方式处理样品无显著差异^[25-26]。但质构仪测量表明,射频加热处理后,纯牛肉以及含商业用添加剂的牛肉制品韧性明显低于蒸汽加热样品^[26]。与传统蒸汽加热样品相比,射

频加热处理的火鸡肉样品具有较低的红度,5℃ 下冷藏过程中,其脂肪氧化速率明显偏低^[25]。

3.4 杀虫

3.4.1 鲜果

Hansen、Wang、Monzon、Ikediala 等对于鲜果的射频杀虫研究表明,射频、热水联合处理以及脉冲射频处理均可有效杀灭苹果中的第五龄苹果小卷蛾,但处理后苹果的品质无法得到保障^[27-28]。而经热水预热后,采用射频、热水联合处理,可以较好地保持苹果、柿子和樱桃的品质,并可有效杀灭鲜果中的第五龄苹果小卷蛾、第三龄墨西哥果蝇^[29-32]。射频处理后,苹果、柿子的硬度增加、含水率降低、颜色加深,但不影响食用品质,并且有助于延长其贮存期^[29-30]。处理后的樱桃只可在 5℃ 下贮藏 24 h,但其品质仍然优于或相当于溴化钾熏蒸处理样品^[31-32]。

由于鲜果的介电特性与害虫接近,因此射频处理过程中,鲜果和害虫同时被加热,处理后果实的品质无法得到保证,但经热水预热后,采用射频、热水联合处理,鲜果的品质仍优于传统的热水处理方式。

3.4.2 核桃

苹果小卷蛾、脐橙蠕虫、玉米粉蛾是核桃中最常见的虫害,Wang、Mitcham 等分别选择其中耐热性最强的第五龄脐橙蠕虫和第三、四龄苹果小卷蛾进行了核桃的射频杀虫研究。研究表明,经射频加热 3 min,核桃升温至 53℃,对于苹果小卷蛾的致死率为 100%^[33]。射频加热至 55℃ 并保持 5 min 可以 100% 杀灭核桃中的第五龄脐橙蠕虫,处理后核桃的气味、感官品质以及外壳质量均不受影响。工业应用研究表明,射频与热风联合加热过程中,间歇搅拌可以有效提高核桃的加热均匀性,将核桃表面加热至 52~60℃,保持 5 min,可以有效杀灭第五龄脐橙蠕虫。处理后核桃在 35℃ 下可贮藏 20 d,对应 4℃ 下可贮藏 2 年,射频处理后核桃的感官品质基本不受影响,含水率略有降低,但分布更均匀,更利于核桃的贮存^[33-41]。

由于核桃的介电特性远远低于害虫,因此射频场对害虫存在优先选择性加热效应。害虫在射频场中的加热速率约为核桃的 1.4~1.7 倍,当核桃中心温度从 20℃ 升高至 53℃ 时,害虫的温度已升至 65.6~74.2℃^[36]。因此,可以在不损害核桃品质的情况下,有效杀灭害虫。利用 27.12 MHz、50 kW 的射频加热系统对核桃进行杀虫处理,当核桃处理量为 1 561.7 kg/h 时,系统的热效率为 79.5%,利用该系统进行核桃灭虫处理的成本为 0.002 7 美元/kg,而化学熏蒸灭虫的成本为 0.002 0~0.002 7 美元/kg^[34]。两

者的经济成本相近,但射频杀虫技术具有明显的品质优势。

4 射频技术应用中存在的主要问题

由于早期缺乏必要的测量方法和手段,射频技术研究的模糊性较大,因此其应用中还存在许多问题。

(1) 缺乏对于物料介电特性的全面数据记载及理论分析,从而无法深入了解射频加热过程中的能量转换机理。

(2) 有关射频加热过程的灭菌效应以及对于产品品质和保质期影响的资料很少见,因此无法与传统加热方式形成鲜明的对比。

(3) 对于射频加热过程的数值计算和模拟工作有待进一步加强,这有助于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,提高产品品质。

(4) 尖角效应的存在,使得射频加热过程中,物料的边角处出现热集中现象,影响产品的品质,可通过引入热风、循环水或者机械搅拌等辅助手段解决该问题。

(5) 目前商业化的射频加热系统多用于焙烤制品的焙后干燥,射频场的均匀性有待进一步提高,可通过调整系统的电感及馈线的布局来实现。

5 射频技术在我国的应用前景

射频技术所特有的选择性加热、含水率自平衡效应以及能量穿透深度大的优点,使其在农产品和食品加工领域具有显著的优势,尤其在农产品干燥、灭虫,以及粉末、多孔物料的杀菌和热处理领域,具有巨大的发展潜力。

5.1 干果灭虫

国内外干果生产企业通常采用化学熏蒸的方法杀虫,处理后干果中不可避免存在化学残留,化学熏蒸气体的排放也对环境产生不良的影响。低剂量的⁶⁰Co γ 射线有抑制呼吸与杀灭微生物等作用,近年来被广泛应用于农副产品的贮藏保鲜。但电离辐照需要专门的辐射源,设备投资相对较大;由于放射线对人体有影响,要十分注意安装及使用过程中操作人员的防护措施,同时还必须解决好辐照源的遮蔽

问题;而且电离辐照的灭酶效果不好;辐照后某些物料的颜色和气味略有变化^[42]。同时,欧洲各国和日本等主要国际市场对辐照食品有抵触,控制十分严格。

利用射频技术对于干果的选择性加热的优点,可在不损害干果品质的情况下,有效杀灭害虫,延长干果的贮存期。

5.2 粉末、多孔食品杀菌

传统加热方式下,热量通过物料表面逐渐传导至内部,加热速率随物料导热性的减小而降低。奶粉、面包等粉末、多孔物料孔隙中空气的存在使其具有非常低的导热性,因此采用传统方式对其进行杀菌处理变得尤为困难。

由于射频在空气中的穿透深度是无穷大的,因此可轻松穿透并快速加热多孔性物料,利用该特性将射频技术应用于传统加热方式难以处理的奶粉、面包等粉末、多孔食品的杀菌过程,可大大提高生产效率和处理后产品的品质。

5.3 农产品、食品干燥

以射频技术所特有的含水率自平衡效应应用于农产品和食品的干燥过程,可大大提高干燥后物料的含水率均匀性,从而提高产品的品质。

同时,与传统干燥方式相比,射频干燥技术具有显著的效率优势。射频干燥过程中,物料内、外同时受热,水分由内部转移到表面蒸发,因此表面温度低于中心温度,利于提高干燥速率。而传统干燥过程中,物料表面温度高于内部温度,热量从外向内传导,除了热传导耗时外,因热量与水分传递的方向相反,从而阻碍了水分传递的速率。另外,利用射频技术的选择性加热的优点,可在干燥的同时杀灭物料中的病菌和虫害。

6 结束语

射频技术作为一种新型的热处理技术,在农产品和食品的干燥、杀虫、杀菌以及肉制品烹制等方面已经有了一定的研究,在改造传统食品加工工艺中展现出诱人前景。随着人们食品安全与品质意识的进一步增长,射频技术在农产品和食品加工业的应用会有更广泛的发展。但目前射频加工工艺与理论体系尚不完善,要推向市场,实现工业化生产还面临不少问题,需要广大科研人员的不懈努力与奋斗。

参 考 文 献

- 1 Barber H. Electroheat[M]. London: Granada Publishing Limited, 1983: 226 ~ 278.
- 2 Marra F, Zhang L, Lyng J G. Radio frequency treatment of foods: review of recent advances [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(4): 497 ~ 508.
- 3 Piyasena P, Dussault C, Koutchma T, et al. Radio frequency heating of foods: principles, applications and related

- properties—a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2003, 43(6): 587~606.
- 4 Tang J, Wang Y, Chan T V C T. Radio-frequency heating in food processing[M] // Barbosa-Canovas G V, Tapia M S, Cano M P. *Novel food processing technologies*. New York: CRC, 2005: 501~524.
- 5 Zhao Y, Flugstad B, Kolbe E, et al. Using capacitive (radio frequency) dielectric heating in food processing and preservation—a review[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 1999, 23(1): 25~55.
- 6 Decareau R V. *Microwaves in the food processing industry*[M]. Orlando: Academic Press, 1985: 2~37.
- 7 吴智慧. 高频介质加热技术在木材工业中的应用[J]. *世界林业研究*, 1994, 7(6): 30~36.
Wu Zhihui. Application of radio-frequency heating technology in the wood-working industry[J]. *World Forestry Research*, 1994, 7(6): 30~36. (in Chinese)
- 8 陈立秋. 射频加热在染整干燥工艺中的应用[J]. *染整技术*, 2007, 29(8): 52~53.
- 9 张胜玉. 塑料高频焊[J]. *国外塑料*, 1999, 17(4): 24~27.
Zhang Shengyu. Radio frequency welding of plastics[J]. *World Plastics*, 1999, 17(4): 24~27. (in Chinese)
- 10 丰惠芬, 王雪顽, 张连成. 射频加热技术及其在医学上的应用[J]. *高电压技术*, 1994, 20(4): 30~33.
Feng Huifen, Wang Xueyuan, Zhang Liancheng. RF heating technique and its application in medical[J]. *High Voltage Engineering*, 1994, 20(4): 30~33. (in Chinese)
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Tang J, Chan T V C T. Microwave and radio frequency in sterilization and pasteurization applications[M] // Yanniotis S, Sundén B. *Heat transfer advances in food processing*. Southampton: WIT Press, 2007: 102~157.
- 14 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.
Liu Yanhong, Tang Juming, Mao Zhihui, et al. Comparison between combined radio frequency and hot air treatment and hot air treatment on bread fresh-keeping[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(9): 323~328. (in Chinese)
- 15 Liu Y, Tang J, Mao Z. Analysis of bread loss factor using modified Debye equations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 93(4): 453~459.
- 16 Von-Hippel A R. *Dielectrics and waves*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1954: 3~5.
- 17 Buffler C R, Stanford M A. Effects of dielectric and thermal properties on the microwave heating of foods[J]. *Microwave World*, 1991, 12(4): 15~23.
- 18 Mudgett R E. Electrical properties of foods in microwave processing[J]. *Food Technology*, 1982, 36(2): 109~115.
- 19 Callebaut J. *Dielectric heating*[R]. Leonardo Energy, 2007.
- 20 Orfeuil M. *Electric process heating*[M]. Columbus: Battelle Press, 1987: 519~573.
- 21 Wang Y, Wig T D, Tang J, et al. Sterilization of foodstuffs using radio frequency heating[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(2): 539~544.
- 22 Luechapattaporn K, Wang Y, Wang J, et al. Microbial safety in radio-frequency processing of packaged foods[J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(7): M201~M206.
- 23 Luechapattaporn K, Wang Y, Wang J, et al. Sterilization of scrambled eggs in military polymeric trays by radio frequency energy[J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(4): E288~E294.
- 24 Orsat V, Bai L, Raghavan G S V, et al. Radio-frequency heating of ham to enhance shelf-life in vacuum packaging[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2004, 27(4): 267~283.
- 25 Tang X, Cronin D A, Brunton N P. The effect of radio frequency heating on chemical, physical and sensory aspects of quality in turkey breast rolls[J]. *Food Chemistry*, 2005, 93(1): 1~7.
- 26 Tang X, Lyng J G, Cronin D A, et al. Radio frequency heating of beef rolls from biceps femoris muscle[J]. *Meat Science*, 2006, 72(3): 467~474.
- 27 Hansen J D, Drake S R, Heidt M L, et al. Radio frequency-hot water dips for postharvest codling moth control in apples [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2006, 30(6): 631~642.
- 28 Hansen J D, Drake S R, Watkins M A, et al. Radio frequency pulse application for heating uniformity in postharvest codling moth (*Lepidoptera: Tortricidae*) control of fresh apples (*Malus domestica* borkh) [J]. *Journal of Food Quality*, 2006, 29(5): 492~504.
- 29 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 Biology and Technology*, 2006, 40(1): 89~96.

- 30 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]. Hort Science, 2007, 42(1): 125 ~ 129.
 - 31 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 Biology and Technology, 2006, 40(2): 197 ~ 203.
 - 32 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 Biology and Technology, 2002, 24(2): 209 ~ 221.
 - 33 Wang S, Ikediala J N, Tang J, et al. Radio frequency treatments to control codling moth in in-shell walnuts[J]. Postharvest Biology and Technology, 2001, 22(1): 29 ~ 38.
 - 34 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 Biology and Technology, 2007, 45(2): 240 ~ 246.
 - 35 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 Biology and Technology, 2007, 45(2): 247 ~ 253.
 - 36 Wang S, Tang J, Cavalieri R P, et al. Differential heating of insects in dried nuts and fruits associated with radio frequency and microwave treatments[J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4): 1175 ~ 1182.
 - 37 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 Biology and Technology, 2002, 26(3): 265 ~ 273.
 - 38 Wang S, Tang J, Sun T, et al. Considerations in design of commercial radio frequency treatments for postharvest pest control in in-shell walnuts[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 304 ~ 312.
 - 39 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 Biology and Technology, 2005, 35(1): 97 ~ 107.
 - 40 Wang S, Tang J. Radio frequency heating: a potential method for post-harvest pest control in nuts and dry products[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2004, 5(10): 1169 ~ 1174.
 - 41 Mitcham E J, Veltman R H, Feng X, et al. Application of radio frequency treatments to control insects in in-shell walnuts [J]. Postharvest Biology and Technology, 2004, 33(1): 93 ~ 100.
 - 42 Kilcast D. Food irradiation: current problems and future potential [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1995, 36(3): 279 ~ 296.
-

(上接第99页)

- 8 刘荣厚,王远远,孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 116 ~ 121.
Liu Ronghou, Wang Yuanyuan, Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 116 ~ 121. (in Chinese)
- 9 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术 [M]. 3版. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 70 ~ 74.
- 10 Xiao B, Sun X F, Sun RunCang. Chemical, structural, and thermal characterizations of alkali-soluble lignins and hemicelluloses, and cellulose from maize stems, rye straw, and rice straw[J]. Polymer Degradation and Stability, 2001, 74(2): 307 ~ 319.
- 11 Hendriks A T W M, Zeeman G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(1): 10 ~ 18.
- 12 Heijnen J J, Mulder A, Enger W, et al. Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in waste-water treatment[J]. The Chemical Engineering Journal, 1989, 41(3): B37 ~ B50.
- 13 周孟津, 张榕林, 蔺金印. 沼气实用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 14 Yadvika, Santosh, Sreekrishnan T R, et al. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review[J]. Bioresource Technology, 2004, 95(1): 1 ~ 10.
- 15 孙儒泳. 动物生态学原理 [M]. 3版. 北京: 北京师范大学出版社, 2003.
- 16 Anthony Mshandete, Lovisa Björnsson, Amelia K Kivaisi, et al. Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste [J]. Renewable Energy, 2006, 31(14): 2385 ~ 2392.