

频率、温度和大豆蛋白对牛乳介电特性的影响*

郭文川 康 飞 朱新华

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为了给牛乳中植物蛋白含量的检测提供一种方法,以生鲜牛乳为对象,采用矢量网络分析仪和同轴探头研究了频率(20~4 500 MHz)、温度(5~75℃)和大豆蛋白质量分数(0~3.98%)对生鲜牛乳介电特性(相对介电常数 ϵ' 和介质损耗因数 ϵ'')的影响规律;建立了27 MHz下介电参数与温度和大豆蛋白质量分数的关系模型,并对模型进行了验证。结果表明, ϵ' 随频率和温度的增大而减小; ϵ'' 在1 000~4 000 MHz间有最小值,且当频率小于1 000 MHz时, ϵ'' 随温度的增大而增大,但大于4 000 MHz时 ϵ'' 随温度的增大而减小; ϵ' 和 ϵ'' 均随大豆蛋白质量分数的增加而线性增大;可用二元二次多项式表达牛乳的 ϵ' 和 ϵ'' 与温度和大豆蛋白质量分数的关系,27 MHz下所建模型的决定系数分别为0.992和0.998。

关键词: 牛乳 大豆蛋白 频率 温度 介电特性

中图分类号: S125; TS252.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0274-05

Influence of Frequency, Temperature and Soy Protein on Dielectric Properties of Raw Milk

Guo Wenchuan Kang Fei Zhu Xinhua

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To offer a method for detecting protein content in milk, raw fresh milk and soy protein powder were used to study the influence of frequency (20~4 500 MHz), temperature (5~75℃) and soy protein mass fraction (0~3.98%) on dielectric properties (dielectric constant ϵ' and dielectric loss factor ϵ'') with vector network analyzer and open-ended coaxial-line probe. The models describing the relationship between ϵ' and ϵ'' with temperature and soy protein mass fraction at 40 MHz were established. The results showed that ϵ' decreased with increase of frequency and temperature. ϵ'' had minimum values at 1 000~4 000 MHz, and it increased with the increase of temperature when frequency was below 1 000 MHz and decreased with temperature increase when frequency was above 4 000 MHz. Both ϵ' and ϵ'' increased linearly with increase of soy protein mass fraction. Two-parameter second-order polynomials could be used to describe the relationship between ϵ' and ϵ'' with temperature and soy protein mass fraction. The determination coefficients of developed polynomials at 27 MHz were 0.992 and 0.998, respectively. The result is helpful to understand the influence of frequency, temperature and soy protein mass fraction on dielectric properties of raw milk, and it offers a basis for developing protein content detector for milk.

Key words: Raw milk Soy protein Frequency Temperature Dielectric properties

引言

蛋白质含量是衡量牛乳品质的主要指标。在生

鲜牛乳中添加廉价的植物蛋白以提高牛乳中的蛋白质含量^[1-4],从而提高牛乳价格成为不法商贩牟取暴利的手段。常用于测量牛乳中蛋白质含量的方法

收稿日期: 2014-12-26 修回日期: 2015-01-20

* 江苏省农产品物理加工重点实验室开放基金资助项目(JAPP2014-2)和中央高校基本科研业务费专项资金重点资助项目(ZD2012017)

作者简介: 郭文川,教授,主要从事食品品质检测技术研究,E-mail: guowenchuan69@126.com

通讯作者: 朱新华,副教授,主要从事食品品质检测技术研究,E-mail: zxhjdxy@sina.com

是 GB 5009.5—2010 的凯氏定氮法,但该方法仅能测定牛乳中的总蛋白质含量,不能检测是否含有植物蛋白以及植物蛋白的含量。研究牛乳中植物蛋白含量的快速检测方法是乳业中亟需解决的关键问题之一。

介电特性是指分子中的束缚电荷对外加电场的响应特性,是电介质的固有性质^[5]。常用的表达介电特性的主要参数有相对介电常数 ϵ' 和介质损耗因数 ϵ'' 。大量的研究表明,物质的成分,例如含水率^[6-7]、含盐量^[8]、脂肪^[9]等是影响食品介电特性的主要因素。此外,电磁场的频率和食品温度也是影响介电特性的主要因素^[10]。

Nunes 等^[11]测量了 1~2 000 MHz 频率范围内全脂、低脂和脱脂新鲜牛乳以及室温下存放 14 d 后牛乳的介电特性。结果表明,介电参数与牛乳中的脂肪含量有关。Guo 等^[12]研究了掺水牛乳和不同新鲜度牛乳的介电特性,结果表明, ϵ'' 与牛乳浓度和新鲜度具有很好的线性相关性,可基于介电参数预测牛乳的浓度和新鲜度。Banach 等^[13]也研究了掺水对牛乳介电参数的影响,发现牛乳掺水率与阻抗、电阻、导纳、电导以及等效电容等具有很好的线性相关性。但目前尚未见植物蛋白含量对牛乳介电特性影响的报道。

为了探索基于介电特性检测牛乳中植物蛋白含量的可行性,本文以最适合于液体介电特性测量的同轴探头技术为测量方法,以生鲜牛乳为对象,以牛乳中最常添加的大豆蛋白粉为添加物,研究频率(20~4 500 MHz)、温度(5~75℃)和大豆蛋白质量分数(0~3.98%)对生鲜牛乳介电特性的影响规律,建立介电参数与温度和大豆蛋白质量分数的关系模型,并对模型进行验证。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

供试生鲜牛乳采集于陕西杨凌某一奶牛养殖户所饲养的“荷斯坦”乳牛。采样于 20 min 运到实验室后置于 3℃ 的冷藏室下保存,整个试验过程不超过 24 h;所用植物蛋白为美国普丽普莱(Puritan's Pride)健康食品公司生产的大豆蛋白粉,试验期间置于 3℃ 下保存。所用生鲜牛乳和大豆蛋白粉的 pH 值分别为 6.81 和 6.04。测得的牛乳样品和大豆蛋白粉的主要成分如表 1 所示。

分别按照给每 100 g 生鲜牛乳中添加 0、1、2、3、4、5 g 大豆蛋白粉的比例配置不同大豆蛋白含量的牛乳样品。根据生鲜牛乳的质量和欲制备的牛乳中大豆蛋白粉的含量计算欲添加的大豆蛋白

粉质量。最终得到的生鲜牛乳中大豆蛋白的质量分数分别为 0、0.83%、1.64%、2.43%、3.22% 和 3.98%。

表 1 生鲜牛乳和大豆蛋白粉的主要成分质量分数

Tab.1 Main ingredients of raw fresh milk and soy protein powder					%
样品	蛋白质	脂肪	灰分	非脂乳固体	含水率
牛乳	2.63	3.03	0.58	9.27	86.40
大豆蛋白粉	83.59	0.65	3.80		4.24

1.2 介电特性的测量

介电特性测量系统由 E5071C 型网络分析仪、85070E 型末端开路同轴探头、85070 软件(Agilent Technology 公司,马来西亚)、计算机、恒温水浴锅(天津泰斯特仪器有限公司)、数显探针式温度计(HANNA 公司,意大利)和升降台组成。测试系统可参照文献[14]。试验前,先将网络分析仪预热 1 h,然后对网络分析仪的测试端口依次进行开路、短路和 50 Ω 负载校准。启动 85070 软件后,设定测量频率范围为 20~4 500 MHz,采样点数为 201 个。随后对同轴探头依次进行开路、短路和 25℃ 去离子水校准。

1.3 测试步骤

测试前 1 h 将样品从冷藏室中取出,将配好的每个大豆蛋白质量分数的样品分别倒入 3 个 50 mL 的试管中,使探头充分浸入牛乳样品中。以精度 0.1℃ 的探针式温度计检测牛奶温度。在 5~75℃ 间以每 10℃ 的间隔设置水浴锅的温度。测量每个温度下样品的 ϵ' 和 ϵ'' 。每个温度下测量 3 次,3 次重复 9 次测量的平均值作为测量结果。

1.4 数据处理和模型建立方法

数据的分析和处理基于 SigmaPlot 12.0 (Systat Software Inc., 美国),模型建立基于 Design-Expert 8.0 (Stat-Ease Inc., 美国)。

2 结果与分析

2.1 频率

图 1 是指定温度下,20~4 500 MHz 频率范围内,大豆蛋白质量分数为 0.83% 生鲜牛乳的 ϵ' 和 ϵ'' 的变化规律。图 1a 说明, ϵ' 随着频率的增大而减小;当频率小于 60 MHz 时, ϵ' 下降迅速;在 100~2 000 MHz 间 ϵ' 随频率的增大下降缓慢。某一频率下, ϵ' 随温度的升高而减小。图 1b 说明, ϵ'' 随频率的增大先减小后增大;在 1 000~4 000 MHz 间有最小值,该最小值随温度的升高而减小;最小值所在处的频率随着温度的升高而增大。当频率小于

300 MHz 时,在双对数坐标下 ε'' 与频率有极好的线性负相关性。当频率小于 1 000 MHz 时, ε'' 随着温度的升高而增大,而当频率大于 4 000 MHz 时, ε'' 随着温度的升高而减小。

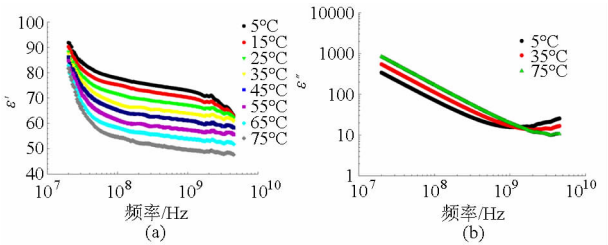
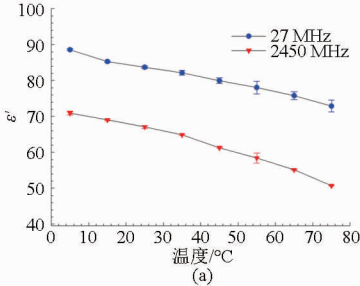


图 1 20 ~ 4 500 MHz 范围内频率对生鲜牛乳 ε' 和 ε'' 的影响

Fig. 1 Influence of frequency of 20 ~ 4 500 MHz on ε' and ε'' of raw fresh milk with 0. 83% of soy protein at indicated temperatures

牛乳是一种非均质胶体分散系。蛋白质胶体和脂肪颗粒被分散在含有盐、乳糖和乳清蛋白的水中。对于非均质物质,不同的相有各自不同的介电参数值,电荷在不同相边界处累积,使两相在界面处产生极化。牛乳介电参数的变化主要是由非均匀物质中的偶极子、电子和原子的极化及 Maxwell - Wagner 效应造成的^[15-16]。当频率不断增大时,偶极子的振



速度滞后于电场的变化,导致随频率增大而减小^[17]。该现象也发现于水果和蔬菜^[18]、坚果^[19] 粮食^[16] 等介电特性的研究中。小于 300 MHz 的低频段下,离子导电性是引起介电损耗的主要原因,表现在低频段下随着频率的增大而减小。大于 300 MHz 的微波频段下,偶极子极化成为引起介电损耗的主要原因,此时牛乳的介电特性与水的介电行为相似。随频率的变化规律也发现于小麦、山核桃^[20]、果汁^[21]、鸡蛋^[22] 等介电特性的研究中。

2.2 温度

美国联邦通讯委员会规定的用于工业、科学、医学 3 个主要机构使用的射频频率主要有:27、41、915、2 450 MHz。27 MHz 和 2 450 MHz 下 5 ~ 75℃ 范围内温度对大豆蛋白质量分数为 3. 22% 的牛乳介电参数影响规律如图 2 所示。在 27 MHz 和 2 450 MHz 下, ε' 随温度升高而减小(图 2a)。27 MHz 下, ε'' 随温度的升高而增大,但 2 450 MHz 下 ε'' 随温度升高先减小后略有增大(图 2b)。该变化规律也发现于其他大豆蛋白含量的牛乳中,同时,也发现于 20 ~ 85℃ 的大豆分离蛋白溶液^[23], 5 ~ 75℃ 的酱油与水的混合物^[24], 以及 15 ~ 95℃ 的果汁^[21] 介电特性的研究中。

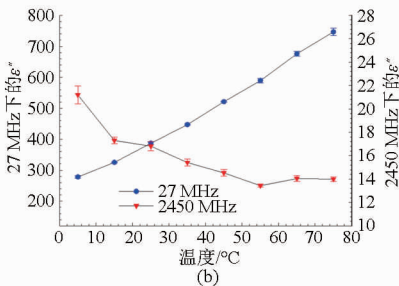


图 2 27 MHz 和 2 450 MHz 下温度对牛乳 ε' 和 ε'' 的影响

Fig. 2 Influence of temperature on ε' and ε'' of milk with 3. 22% of soy protein at 27 MHz and 2 450 MHz

由于离子导电性是引起低频下介电损耗的主要原因。温度升高,离子导电性增强,从而使得 ε'' 增大。在微波频段,偶极子极化是引起介电损耗的主要原因。偶极子极化与离子导电性对 ε'' 的影响效果相反。低频下 ε'' 随温度增大,而微波频率下 ε'' 随温度减小。该现象也发现于其他大豆蛋白含量下,

同时也报道于豆类^[25]、板栗^[26] 介电特性的研究中。

2.3 大豆蛋白质量分数对介电参数的影响

图 3 给出了 25℃ 条件下,27 MHz 和 2 450 MHz 下,大豆蛋白质量分数对牛乳介电参数的影响规律。在给定频率下, ε' 和 ε'' 均随大豆蛋白质量分数的增加而线性增大,纯牛乳具有最小的 ε' 和 ε'' 。大豆蛋

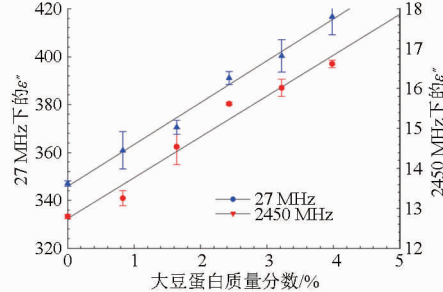
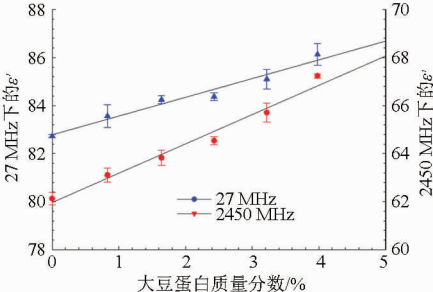


图 3 27 MHz 和 2 450 MHz 下大豆蛋白质量分数对生鲜牛乳 ε' 和 ε'' 的影响

Fig. 3 Influence of soy protein content on ε' and ε'' of milk at 27 MHz and 2 450 MHz

白的添加,增大了牛乳的离子数,从而导致了 ε' 和 ε'' 的增大。25℃ 下,当频率一定时, ε' 和 ε'' 与大豆蛋白质量分数的线性关系可表示为

$$\varepsilon' = a_1 S + b_1 \tag{1}$$

$$\varepsilon'' = a_2 S + b_2 \tag{2}$$

式中 S ——大豆蛋白质量分数,%, $0 \leq S \leq 3.98\%$
 a_1, b_1, a_2, b_2 ——回归常数

图 4 给出了 25℃ 下, 20 ~ 4 500 MHz 范围内式(1)、(2)在各频率下的决定系数 $R_{\varepsilon'}^2$ 和 $R_{\varepsilon''}^2$ 。由图 4 可以得出,在所测频段内,式(1)的决定系数均大于 0.95,式(2)的决定系数均大于 0.97,说明大豆蛋白质量分数与介电参数具有很好的线性相关

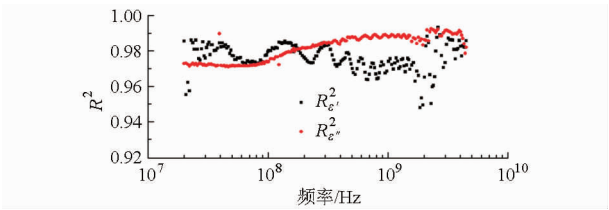


图 4 20 ~ 4 500 MHz 频率范围内式(1)、(2)在各频率下的决定系数

Fig. 4 Determination coefficients of Equations (1) and (2) from 20 MHz to 4 500 MHz at 25℃

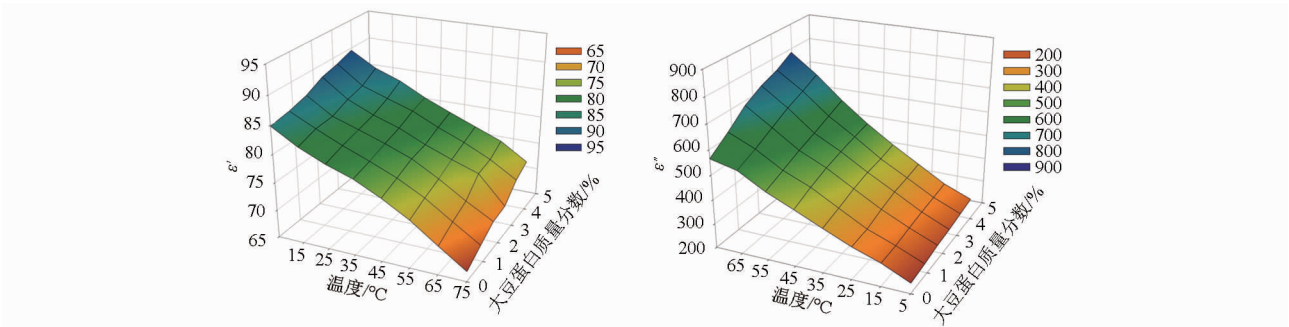


图 5 27 MHz 下温度和大豆蛋白质量分数对牛乳 ε' 和 ε'' 的影响
Fig. 5 Effect of temperature and soy protein content on ε' and ε'' at 27 MHz

$$\begin{aligned} \varepsilon''_{27} = & 231.3 + 3.544T + 8.812S + \\ & 0.623ST + 0.016T^2 - 1.742S^2 \end{aligned} \tag{4}$$

式中 T ——温度, $0 \leq T \leq 75^\circ\text{C}$
 $\varepsilon'_{27}, \varepsilon''_{27}$ ——27 MHz 下的 ε' 和 ε''

对式(3)、(4)进行方差分析,结果表明,对于式(1),除 S^2 项外,其余各项均在 $P < 0.01$ 的水平上显著;对于式(2),除 S^2 项在 $P < 0.05$ 的水平上显著外,其余各项均在 $P < 0.01$ 的水平上显著。式(3)、(4)的决定系数分别为 0.992 和 0.998。对其他频率,如 41、915、2 450 MHz 等频率下所建立的拟合方程的方差分析结果也表明,均可用二元二次关系式表达介电参数与温度和大豆蛋白含量的关系。

3.2 模型验证

为了验证上述所建模型的准确性,在大豆蛋白质量分数为 0 ~ 3.98% 范围内,随机配制了 5 个不

性。当已知介电参数时,可以根据一定条件下二者之间的线性关系式计算出牛乳的植物蛋白质量分数。

为了满足不同温度下大豆蛋白质量分数检测的需求,有必要建立考虑温度影响的介电参数与大豆蛋白质量分数的关系模型。

3 介电参数与温度和大豆蛋白质量分数关系模型

3.1 模型建立

图 5 是 27 MHz 下生鲜牛乳的温度与大豆蛋白质量分数对 ε' 和 ε'' 的影响规律。由图 5 知,温度和大豆蛋白质量分数共同影响牛乳的介电参数。27 MHz 下, ε' 随大豆蛋白质量分数增加而增大,随温度升高而减小。 ε'' 均随大豆蛋白质量分数和温度的增大而增大。

27 MHz 下,牛乳介电参数与温度和大豆蛋白质量分数的关系可表达为

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{27} = & 85.58 - 0.188T + 0.801S + \\ & 9.344 \times 10^{-3}ST - 6.893 \times 10^{-4}T^2 - 0.045S^2 \end{aligned} \tag{3}$$

同水平大豆蛋白质量分数的牛乳样品,测量了各样品在 5 ~ 75℃ 范围内任意 5 个温度下的介电参数,将测量的介电参数与根据式(3)、(4)计算的介电参数进行比较,结果如图 6 所示。图 6a、6b 的决定系数分别为 0.981 和 0.999,说明式(3)、(4)能准确地描述介电参数与温度和大豆蛋白质量分数的关系。当已知温度和介电参数时,可以利用牛顿迭代法或查表法求出被测样品大豆蛋白的质量分数。

4 结束语

在 20 ~ 4 500 MHz 内,牛乳的 ε' 随频率的增大而减小, ε'' 随频率的增大先减小后增大, ε'' 的最小值出现在 1 000 ~ 4 000 MHz 间。 ε' 随温度的增大而减小。当频率小于 1 000 MHz 时, ε' 随温度增大而增大,但当大于 4 000 MHz 时, ε' 随温度增大而减小。

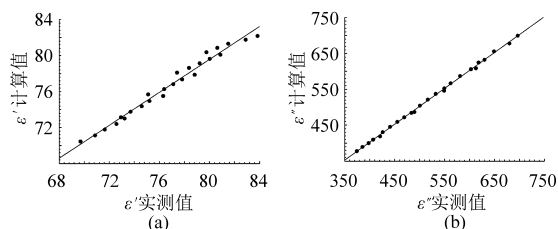


图 6 27 MHz 下 ε' 和 ε'' 的计算值与实测值的比较

Fig. 6 Calculated ε' and ε'' against measured ones at 27 MHz

ε' 和 ε'' 均随大豆蛋白质量分数的增大而线性增大。可用二元二次多项式表达某些频率下 ε' 和 ε'' 分别与温度和大豆蛋白质量分数的关系; 27 MHz 下, 该关系式的决定系数分别为 0.992 和 0.998。对 27 MHz 下所建关系式的检验结果说明, 模型能精确地表达介电参数与温度和大豆蛋白含量的关系。本研究为生鲜牛乳中大豆蛋白含量检测仪的开发提供了基础。

参 考 文 献

- 1 Sanchez-Martinez M L, Aguilar-Caballos M P, Gomez-Hens A. Homogeneous immunoassay for soy protein determination in food samples using gold nanoparticles as labels and light scattering detection[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 636(1): 58–62.
- 2 曹佳, 赵武奇, 魏振东. 掺假羊奶原奶中植物蛋白的近红外快速检测[J]. *农产品加工·学刊*, 2012(3): 131–133.
- 3 Scholl P F, Farris S M, Mossoba M M. Rapid turbidimetric detection of milk powder adulteration with plant proteins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(7): 1498–1505.
- 4 Jaiswal P, Jha S N, Borah A, et al. Detection and quantification of soymilk in cow-buffalo milk using attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy [J]. *Food Chemistry*, 2015, 168: 41–47.
- 5 郭文川, 朱新华. 国外农产品及食品介电特性测量技术及应用[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 308–312.
- 6 Trabelsi S, Nelson S O. Nondestructive sensing of bulk density and moisture content in shelled peanuts from microwave permittivity measurements[J]. *Food Control*, 2006, 17(4): 304–311.
- 7 Guo Wenchuan, Wang Shaojin, Tiwari G, et al. Temperature and moisture dependent dielectric properties of legume flour associated with dielectric heating[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2010, 43(2): 193–201.
- 8 Ahmed J, Ramaswamy H S, Raghavan V G S. Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 82(3): 351–358.
- 9 Gunasekaran N, Mallikarjunan P, Eifert J, et al. Effect of fat content and temperature on dielectric properties of ground beef[J]. *Transactions of the ASAE*, 2005, 48(2): 673–680.
- 10 朱新华, 郭文川. 影响食品射频—微波介电特性的因素及影响机理分析[J]. *食品科学*, 2010, 31(17): 41–44.
- 11 Nunes A, Bohigas X, Tejada J. Dielectric study of milk for frequencies between 1 and 20 GHz[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 76(2): 250–255.
- 12 Guo Wenchuan, Zhu Xinhua, Liu Hui, et al. Effects of milk concentration and freshness on microwave dielectric properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(3): 344–350.
- 13 Banach J K, Żwica R, Szpendowski J, et al. Possibilities of using electrical parameters of milk for assessing its adulteration with water[J]. *International Journal of Food Properties*, 2012, 15(2): 274–280.
- 14 Guo Wenchuan, Liu Yi, Zhu Xinhua, et al. Temperature-dependent dielectric properties of honey associated with dielectric heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 102(3): 209–216.
- 15 Wang S, Monzon M, Johnson J, 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.
- 16 Sacilik K, Colak A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz[J]. *Powder Technology*, 2010, 203(2): 365–370.
- 17 郭文川, 王婧, 刘驰. 基于介电特性的薏米含水率检测方法[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 113–117.
- 18 Guo Wenchuan, Wang Jing, Liu Chi. Predicating moisture content of pearl barley based on dielectric properties[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 113–117. (in Chinese)
- 19 Nelson S O. Frequency- and temperature-dependent permittivities of fresh fruits and vegetables from 0.01 to 1.8 GHz[J]. *Transactions of the ASAE*, 2003, 46(2): 567–574.
- 20 Trabelsi S, Nelson S O. Microwave dielectric properties of shelled and unshelled peanuts[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(4): 1215–1222.
- 21 Lawrence K C, Nelson S O, Kraszewski A W. Temperature-dependence of the dielectric-properties of pecans[J]. *Transactions of the ASAE*, 1992, 35(1): 251–255.
- 22 Zhu Xinhua, Guo Wenchuan, Wu Xiaoling. Frequency- and temperature-dependent dielectric properties of fruit juices associated with pasteurization by dielectric heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(2): 258–266.
- 23 Wang Jian, Tang Juming, Wang Yifen, et al. Dielectric properties of egg whites and whole eggs as influenced by thermal treatments[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2009, 42(7): 1204–1212.

15(1):164 – 170.

37 Ma L H, Wu P T, Wang Y K. Spatial distribution of roots in a dense jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1 – 2):57 – 68.

38 Ye Y, Zhou K, Song L, et al. Dew amounts and its correlations with meteorological factors in urban landscapes of Guangzhou, China[J]. Atmospheric Research, 2007, 86(1):21 – 29.

39 张强, 王胜. 关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究[J]. 干旱气象, 2007, 25(2):1 – 4.
Zhang Qiang, Wang Sheng. Processes of water transfer over land surface in arid and semi-arid region of China[J]. Arid Meteorology, 2007, 25(2): 1 – 4. (in Chinese)

40 Beysens D. The formation of dew[J]. Atmospheric Research, 1995, 39(1):215 – 237.

41 李晓彬, 汪有科, 赵春红, 等. 水分调控对梨枣果实品质与投入产出效益的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4):818 – 822.
Li Xiaobin, Wang Youke, Zhao Chunhong, et al. Effect of regulated irrigation on input-output benefits of pear jujube[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4):818 – 822. (in Chinese)

42 Kidron G J. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel[J]. Atmospheric Research, 2000, 55(3 – 4):257 – 270.

43 Kidron G J. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 96(1 – 3): 1 – 8.

44 Munné-Bosch S, Nogues S, Alegre L. Diurnal variations of photosynthesis and dew absorption by leaves in two evergreen shrubs growing in Mediterranean field conditions[J]. New Phytologist, 1999, 144:109 – 119.

45 Xu Y Y, Yan B X, Guo Y D. Measurement and analysis of formation conditions of dew in *Carex lasiocarpa* marsh[J]. Wetland Science, 2009(2):155 – 161.

46 Beysens D, Muselli M, Nikolayev V, et al. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas[J]. Atmospheric Research, 2005, 73(1):1 – 22.

47 Dragoni D, Lakso A N, Piccioni R M. Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(1 – 2):85 – 94.

48 Kume T, Komatsu H, Kuraji K, et al. Less than 20-min time lags between transpiration and stem sap flow in emergent trees in a Bornean tropical rainforest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(6 – 7):1181 – 1189.

49 Steppe K, De Pauw D J W, Doody T M, et al. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7 – 8):1046 – 1056.

50 Oren R, Pataki D E. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests [J]. Oecologia, 2001, 127(4):549 – 559.

51 Chen D Y, Wang Y K, Liu S Y, et al. Response of relative sap flow to meteorological factors under different soil moisture conditions in rainfed jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) plantations in semiarid Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136:23 – 33.

52 张强, 王胜, 问晓梅, 等. 黄土高原陆面水分的凝结现象及收支特征试验研究[J]. 气象学报, 2012, 70(1):28 – 35.
Zhang Qiang, Wang Sheng, Wen Xiaomei, et al. On measuring methods and exploitation technology for dew fall on land surface [J]. Plateau Meteorology, 2012, 70(1):28 – 35. (in Chinese)

53 叶有华, 彭少麟. 露水对植物的作用效应研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(11):3190 – 3196.
Ye Youhua, Peng Shaolin. Review of dew action effect on plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11):3190 – 3196. (in Chinese)

54 Monteith J L. Dew[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society, 1956, 42:572 – 580.

(上接第 278 页)

23 Ahmed J, Ramaswamy H S, Raghavan G S V. Dielectric properties of soybean protein isolate dispersions as a function of concentration, temperature and pH[J]. LWT—Food Science and Technology, 2008, 41(1): 71 – 81.

24 Tanaka F, Morita K, Mallikarjunan P, et al. Analysis of dielectric properties of soy sauce[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(1): 92 – 97.

25 Zhu Xinhua, Guo Wenchuan, Wu Xiaoling, et al. Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(1): 143 – 150.

26 Guo Wenchuan, Wu Xiaoling, Zhu Xinhua, et al. Temperature-dependent dielectric properties of chestnut and chestnut weevil from 10 to 4 500 MHz[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 340 – 347.