



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180269

## 基于介电特性的青萝卜干燥品质预测模型

高亚平<sup>1</sup>, 安峰<sup>2</sup>, 赵东海<sup>1</sup>, 吴龙<sup>1</sup>, 徐庆<sup>1</sup>, 郑兆启<sup>1</sup>, 王瑞芳<sup>1</sup>

(1. 天津市低碳绿色过程装备国际联合研究中心, 天津科技大学机械工程学院, 天津 300222;  
2. 艾默生过程管理(天津)阀门有限公司, 天津 301700)

**摘要:** 以青萝卜为实验物料, 利用网络分析仪, 采用同轴探头法测量了在 16~3 500 MHz 的频率范围内, 湿基含水率为 15%~93.20%, 物料温度为  $(36 \pm 1)^\circ\text{C}$  的青萝卜的介电常数  $\epsilon'$  和介电损耗因子  $\epsilon''$ 。分析了频率、含水率、糖度、密度与介电特性的关系, 建立了 915 MHz 和 2 450 MHz 下介电特性与含水率、糖度、密度的关联模型, 检验了基于介电特性预测含水率、糖度、密度的可行性。结果表明: 在 16~3 500 MHz 频率段内, 介电常数  $\epsilon'$  和介电损耗因子  $\epsilon''$  随着频率的增大而减小。介电常数  $\epsilon'$  随着含水率的增大而增大, 介电损耗因子  $\epsilon''$  在湿基含水率为 15%~60% 时, 随着含水率的增大而增大, 之后随着含水率的增大而降低。糖度与含水率呈负相关。可用二元一次方程描述含水率、糖度、密度与介电特性的关系, 对模型进行方差分析, 各模型的决定系数均大于 0.92,  $P$  值小于 0.05, 表明所得基于介电特性预测干燥过程中青萝卜的含水率、糖度、密度的模型是准确的。

**关键词:** 青萝卜; 介电特性; 频率; 湿基含水率; 糖度; 密度

中图分类号: TQ051.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2019)04-0063-09

## Green Turnip Drying Quality Prediction Model Based on Dielectric Properties

GAO Yaping<sup>1</sup>, AN Feng<sup>2</sup>, ZHAO Donghai<sup>1</sup>, WU Long<sup>1</sup>, XU Qing<sup>1</sup>,  
ZHENG Zhaoqi<sup>1</sup>, WANG Ruifang<sup>1</sup>

(1. Research Center of Low-Carbon Green Process Equipment, College of Mechanical Engineering,  
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;  
2. Emerson Process Management (Tianjin) Valves Co., Ltd., Tianjin 301700, China)

**Abstract:** The dielectric constant and dielectric loss factors of green turnip were investigated with the coaxial probe method using a network analyzer in the frequency range of 16~3 500 MHz. The moisture content and temperature of green turnip were 15%~93.20% and  $(36 \pm 1)^\circ\text{C}$ . A model to study the relationship between dielectric properties and moisture content, sugar content and density at 915 MHz and 2 450 MHz was then established. The results show that the dielectric constant and the dielectric loss decrease with the increase of frequency from 16 MHz to 3 500 MHz. The dielectric constant increases with the increase of moisture content. The dielectric loss increases when the moisture content increases from 15% to 60%, and then decreases when further increasing the moisture content. The sugar content is negatively correlated with the moisture content. The binary linear equation can be used to describe the relationship between moisture content, sugar content, density and dielectric properties. Variance analysis of the model indicate that the determination coefficient of each model is greater than 0.92 and the  $P$  value is less than 0.05. So the model based on the dielectric properties to predict the moisture content, sugar content and density of green turnip during drying is accurate.

**Key words:** green turnip; dielectric properties; frequency; moisture content; sugar content; density

收稿日期: 2018-08-11; 修回日期: 2019-01-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFD0400900)

作者简介: 高亚平(1993—), 女, 天津人, 硕士研究生; 通信作者: 王瑞芳, 教授, wangruifang@tust.edu.cn

青萝卜是中国萝卜中的绿皮萝卜,其主要产地为天津和山东.其中,天津青萝卜有“沙窝萝卜赛鸭梨”的美誉.青萝卜中富含葡萄糖、蔗糖、果糖、多缩戊糖、粗纤维、维生素 C、矿物质、蛋白质及多种氨基酸等营养物质,同时还具有药用价值,对增加机体免疫力,抑制癌细胞的生长有重要作用<sup>[1]</sup>.青萝卜主要以生食为主,人称“水果萝卜”.除生食外,还可炒食、腌渍、干制以及开发萝卜脆等休闲食品.在制作萝卜干、腌渍及休闲食品的过程中,均需对萝卜进行干燥处理.而在干燥过程中快捷和准确地检测品质是保证产品品质的重要手段.

介电特性是物料的固有属性,其描述处于电磁场中的物质与电磁波相互作用的能力.介电特性参数主要包括介电常数  $\epsilon'$  和介质损耗因子  $\epsilon''$ .介电常数对应于物料的电容,表征物料从电磁场中贮存电磁能的能力,该部分能量是可逆的;介质损耗因子对应于物料电阻,表示从电磁场中耗散的电磁能,该部分能量是不可逆的.介电特性一般受物料自身特性和电磁场状态的影响,其主要影响因素有频率,物料的含水率、温度、密度及组分等<sup>[2-4]</sup>.

目前,基于介电特性的无损检测技术被广泛研究<sup>[5-7]</sup>,其中基于介电特性测量物料含水率的研究最为广泛.张国坤<sup>[8]</sup>对基于介电特性的玉米叶片含水率无损检测进行了研究,建立了玉米叶片介电特性参数与含水率之间的关系模型,并应用此模型开发设计了一款玉米叶片含水率检测系统.

更多研究者希望探求介电特性与产品品质间的关系,从而实现基于介电特性对产品品质的检测.在鲜果的品质检测中,利用理化指标评价鲜果品质,再利用介电特性检测其理化指标已被广泛研究.柯大观<sup>[9]</sup>基于介电特性对苹果的新鲜度、腐烂程度进行研究并实现分选.房丽洁等<sup>[10]</sup>研究了用介电特性预测库尔勒香梨的糖度和硬度,结果表明对糖度的预测效果较好,但对硬度的预测效果较差.袁子慧等<sup>[11]</sup>探索了用介电常数和介质损耗因子预测芒果的总糖及 pH,发现芒果的介电特性与芒果总糖及 pH 的相关度较高.

在果蔬干燥过程中,通过测试干燥过程中理化指标的变化,建立理化指标与介电参数间的关系,实现实时检测产品的品质,具有很好的便捷性和快速性.秦文等<sup>[12]</sup>利用介电特性对蔗糖溶液、新鲜胡萝卜、葱、蘑菇和生菜在干燥过程中品质的检测进行了研究,实现了在线、无损监控食品干燥过程.王琴<sup>[13]</sup>研究树莓浆果在微波干燥中介电常数、介质损耗因子

与其温度和含水率的关系,建立了微波加热过程中介电特性与温度、含水率之间的数学模型,并将其运用于介电特性检测系统.Changrue 等<sup>[14]</sup>研究了在草莓和胡萝卜渗透脱水时糖的浓度与介电特性的关系,得出随着糖的浓度上升草莓和胡萝卜的介电常数和介质损耗因子均下降的结论.Funebo 等<sup>[15]</sup>研究了蘑菇、欧芹和山萝卜在新鲜和干燥情况下,温度、含水率、密度与介电特性之间的关系.

目前,未见报道用介电特性表征青萝卜干燥过程中理化参数变化的研究.考虑到除了水分,青萝卜含糖较多,总糖量为 20 ~ 60 mg/g<sup>[16-17]</sup>,本文主要研究频率、含水率、糖度、密度与介电特性的关系,并建立相关模型,为开发基于介电特性预测青萝卜干燥过程中含水率、糖度等的检测仪器提供理论数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及样品的制备

选用从天津博疆市场购买的无病虫害及机械损伤的新鲜青萝卜,清洗后切片,尺寸为  $\phi$  46.2 mm × 5 mm,备用.实验前测定青萝卜片的湿基含水率,为 93.20%.

利用 AR1140 型电子天平分别称取 18 片初始含水率的样品,置于培养皿中,用 DL-101-3BS 型恒温鼓风干燥箱 60 °C 热风干燥至不同湿基含水率,取出后放入密封性良好的密封袋中,4 °C 密封放置 24 h,使样品水分充分均匀.

### 1.2 测量方法与步骤

#### 1.2.1 介电参数测量方法

介电特性测定系统主要由计算机、E5063A 型网络分析仪、校准套件、开放式同轴探头等组成.将不同湿基含水率的样品放置在圆柱形测量单元下,探头底面紧贴样品,确保在测量过程中探头不与外部空气接触,通过计算机读出介电常数与介质损耗因子的数值.

#### 1.2.2 湿基含水率测量方法

物料湿基含水率的测定方法根据 AOAC 925.10 (2002) 方法测定.将物料放置于 105 °C 的热风干燥箱中,当物料的质量不再变化时,认为物料已完全干燥.物料湿基含水率的计算公式为

$$W = (m_t - m_g) / m_t \quad (1)$$

式中:  $W$  为干燥到  $t$  时刻的湿基含水率,%;  $m_t$  为干燥到  $t$  时刻的物料质量, g;  $m_g$  为物料绝干质量, g.

### 1.2.3 糖度测量方法

采用 PAL-BX/ACID F5 型糖酸一体机测量物料的糖度( $B$ ),每个样品测量 5 次,取平均值,糖度的单位为  $\text{g}/100\text{g}$  物料。

### 1.2.4 密度测量方法

密度的测量采用体积替代法,将样品放在含定量水的量筒中,通过测出样品的体积计算密度,单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

### 1.2.5 测量步骤

把不同湿基含水率的青萝卜样品放入称量瓶(带盖)上,再放入恒温水浴锅中加热,利用热电偶测量样品温度,当样品温度为  $(36 \pm 1)^\circ\text{C}$  时进行介电特性测量。对于网络分析仪,开机预热 1 h 后,用开路、短路和  $50\ \Omega$  匹配阻抗校准实验中所用网络分析仪的端口,接着利用开路、短路和  $25^\circ\text{C}$  的去离子水校准同轴探头,并选择测量频率范围为  $16\ \text{MHz} \sim 3.5\ \text{GHz}$ 。同一湿基含水率物料选择 6 片,每片选取正反两面 10 个测量点,之后取 3 片用于测密度,另外 3 片用于测糖度。实验重复 3 次,测量数据取平均值。

### 1.3 数学模型的建立

根据得到的不同含水率、糖度、密度的青萝卜的介电特性,建立介电特性与含水率、糖度、密度之间的关联模型,探究介电特性与物料品质的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 热风干燥动力学

在热风温度为  $60^\circ\text{C}$  时,青萝卜的干燥动力学曲线如图 1 所示。

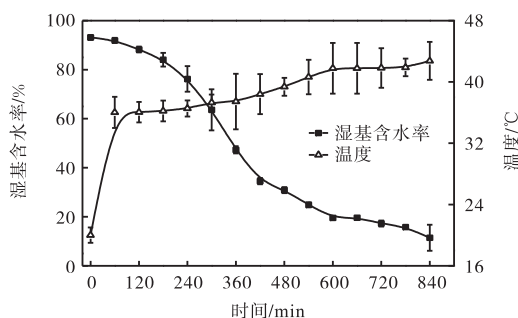


图 1 青萝卜的干燥动力学曲线

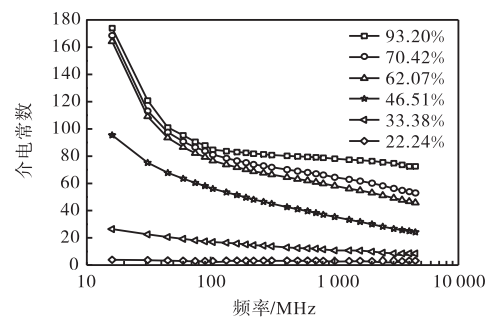
Fig. 1 Drying kinetic curve of green turnip

由图 1 可知:随着干燥时间的增长,物料含水率逐渐降低,温度不断升高。前 120 min,物料湿基含水率由 93.20% 降到 88.00%,温度由  $20^\circ\text{C}$  增至  $36^\circ\text{C}$ ,这是一个快速升温阶段。120 ~ 360 min,物料温度几

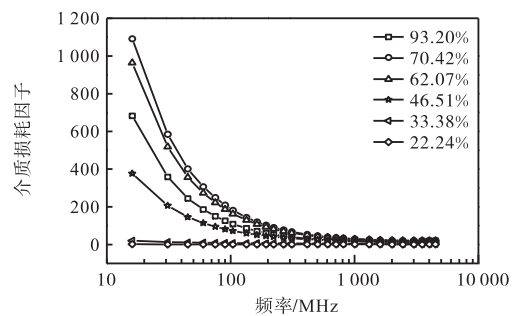
乎保持恒定,维持在  $36 \sim 37^\circ\text{C}$ ,这是因为物料从干燥介质吸收的热能全部消耗于水分的蒸发,此时,物料的湿基含水率由 88.00% 降至 47.32%。之后物料内部水分经内扩散迁移至表面的水分不足以补偿表面蒸发的水分,所以干燥速率减慢,进入降速干燥阶段。随着降速干燥的进行,青萝卜中的含水率进一步降低,使其内部水分向表面扩散也越来越少,因此物料从干燥介质中吸收的热能部分用于温度的升高。这与郑先哲等<sup>[18]</sup>对热风干燥的动力学研究的曲线趋势一致。在整个干燥过程中,物料的温度范围为  $20 \sim 42^\circ\text{C}$ ,其中主要的恒速和降速干燥过程温度处于  $36 \sim 42^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 频率与介电特性的关系

由于介电特性受频率的影响,本文研究了  $16\ \text{MHz} \sim 3.5\ \text{GHz}$  频率范围内的介电特性变化,结果如图 2 所示。



(a) 频率对青萝卜介电常数的影响



(b) 频率对青萝卜介电损耗因子的影响

图 2 频率对不同湿基含水率的青萝卜介电特性的影响  
Fig. 2 Effect of frequency on dielectric properties of green turnip with different moisture content

由图 2 可知:在  $16\ \text{MHz} \sim 3.5\ \text{GHz}$  频段内,不同含水率的青萝卜的介电常数  $\epsilon'$  和介电损耗因子  $\epsilon''$  都随着频率的增大而减小,其中低频段的变化趋势更为显著。这与宋春芳等<sup>[19]</sup>对果蔬的介电特性随频率的变化研究结果一致。湿基含水率为 70.42% 的青萝卜,在频率从  $16\ \text{MHz}$  增至  $300\ \text{MHz}$  的过程中,介电

常数从 168.6 降低到 71.9; 在频率从 300 MHz 增加至 3.5 GHz 的过程中, 介电常数从 71.9 只降低到 54.9. 这是因为在低频段, 离子传导起主要作用; 在高频段, 偶极子的转向起主导作用. 而且, 随着频率不断增强, 偶极子转向跟不上频率的变化, 所以, 介电常数和介质损耗因子不断减小. 从图 2 还可以看出: 介电特性在高含水率时随频率的变化更显著. 频率从 16 MHz 增至 3.5 GHz, 湿基含水率为 70.42% 的青萝卜的介电常数下降了 113.1, 而湿基含水率为 33.38% 的青萝卜的介电常数下降了 17.8. 其原因是样品的含水率越高, 自由水的含量越高, 水分子的偶极子转向越剧烈, 介电常数及介质损耗因子越大. 这说明频率和含水率对介电常数和介质损耗因子有很大的影响. 工业上和家用微波炉主要使用的微波频率为 915 MHz 和 2 450 MHz, 因此本文在后续研究中主要取 915 MHz 和 2 450 MHz 作为研究频率.

### 2.3 温度与介电特性的关系

考虑到温度对介电特性的影响, 针对图 1 中物料在干燥过程中的温度范围, 本文研究了不同湿基含水率的青萝卜在物料温度为 20 ~ 50 °C 变化时的介电特性(图 3).

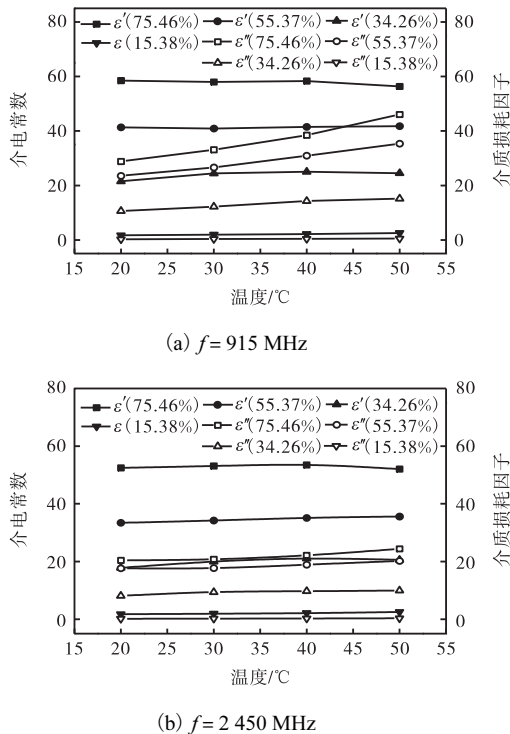


图 3 物料温度对不同湿基含水率的青萝卜介电特性的影响  
Fig. 3 Effect of temperature on dielectric properties of green turnip with different moisture content in wet base

由图 3 可知: 当频率为 2 450 MHz、物料的含水

率为定值、温度从 20 °C 升到 50 °C 时, 介电常数和介质损耗因子几乎没有变化. 当频率为 915 MHz 时, 介电常数没有变化, 介质损耗因子在高含水率时表现出随温度增加缓慢增加的趋势. 在湿基含水率为 75.46% 时, 介质损耗因子随温度的波动最大, 由 20 °C 升到 50 °C 时, 介质损耗因子由 28.82 增加到 46.06. 考虑到本文在 60 °C 热风干燥条件下, 物料的温度范围主要处于 36 ~ 42 °C, 在该温度区间, 介质损耗因子增加 4, 增加较小, 故在后续研究中, 不考虑温度变化对介电特性的影响, 将温度统一设置为 (36 ± 1) °C.

### 2.4 湿基含水率与介电特性的关系

青萝卜干燥过程中湿基含水率与介电特性的关系如图 4 所示.

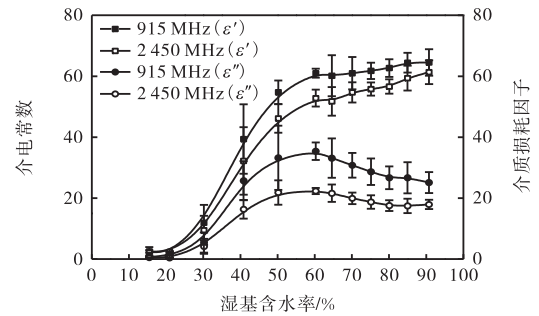


图 4 青萝卜干燥过程中湿基含水率与介电特性的关系  
Fig. 4 Relationships between moisture content and dielectric properties of green turnip in drying

图 4 表明: 介电常数和介质损耗因子在湿基含水率为 15% ~ 20% 时, 几乎没有变化. 这是因为此时青萝卜内的水分主要是结合水, 在交变电磁场中, 水分子的极化以及离子传导较弱, 所以介电常数以及介质损耗因子几乎不变. 湿基含水率从 20% 增至 60% 时, 介电常数和介质损耗因子快速增加, 这是因为随着含水率的增加, 水分子的极化增强, 使介电常数和介质损耗因子增大. 湿基含水率从 60% 增至 90% 时, 介电常数增加相对较小, 介质损耗因子略有下降, 这是因为随着含水率增加, 自由水含量多, 离子的相对浓度降低, 离子传导作用减弱, 导致介质损耗因子略有下降. 此结果与 Van 等<sup>[20]</sup>对牛肉粒的介质损耗因子随含水率的变化趋势以及与桑田等<sup>[21]</sup>对黑莓的介电常数随含水率的变化趋势相似. 同时从细胞层次考虑, 新鲜青萝卜的组织细胞膜为液晶相, 流动性大, 随干燥不断进行, 细胞膜由液晶相向凝胶相转化, 细胞膜变得刚硬, 流动性变差, 细胞液的黏滞系数增大, 膜的通透能力下降, 因而介电常数减小<sup>[22-23]</sup>.



## 2.5 糖度与介电特性的关系

张毛赛等<sup>[24]</sup>研究指出:蔗糖与葡萄糖粉末的介电常数为  $1.70 \pm 0.15$ , 介质损耗因子为  $0.03 \pm 0.11$ . 该数值远远小于水的介电常数 78 (2.45 GHz, 室温) 和介质损耗因子 12. 同时指出, 蔗糖含量对物料的介电特性的影响不明显. 增加葡萄糖含量使得介质损耗因子有下降的趋势, 但其主要原因在于葡萄糖可以结合水分子, 导致自由水含量发生改变, 从而改变介电特性. 因此, 糖本身对物料介电特性的影响很小. 但糖度是果蔬品质研究中的一个重要参数, 方便快捷地检测糖度也是品质检测中的重要指标. 在干燥过程中, 伴随着水分的减少, 糖度在不断增加, 由糖度与水分的相关性, 建立糖度与介电特性的关系, 有利于品质参数糖度的快速检测.

图 5 表示糖度、密度与湿基含水率的关系: 随着干燥的进行, 含水率越来越少, 糖度越来越高, 含水率与糖度成反比的关系. 这与郭文川等<sup>[25]</sup>得出桃子的糖度与含水率呈负相关的结果一致.

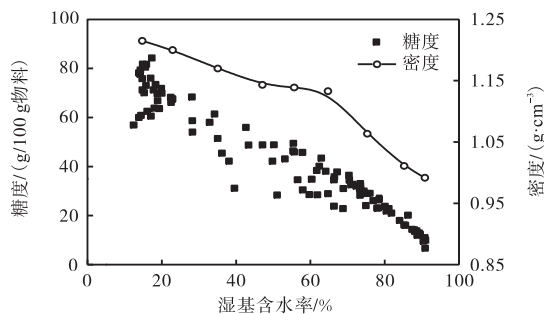


图 5 糖度、密度与湿基含水率的关系

Fig. 5 Relationship between sugar content, density and moisture content

青萝卜干燥过程中糖度与介电特性的关系如图 6 所示. 由图 6 可知: 在频率为 915 MHz 时, 糖度从 10 g/100 g 物料升到 40 g/100 g 物料时, 介电常数从 64 降到 61, 介质损耗因子从 25 升至 35, 这正好对应干燥过程中物料湿基含水率为 90% 降到 60%. 当糖度从 40 g/100 g 物料升到 70 g/100 g 物料时, 介电常数从 61 下降到 2, 介质损耗因子从 35 降到 1, 对应湿基含水率从 60% 下降到 20%, 此时, 物料中主要为干物质和结合水. 因此, 在糖度变化时, 介电特性变化的主要原因是物料中含水率的变化. Changruc 等<sup>[14]</sup>对草莓和胡萝卜内部的糖度与介电特性的关系、Tulasidas 等<sup>[26]</sup>对不同含糖量的葡萄中糖度与介电特性的关系以及刘熠<sup>[27]</sup>对蜂蜜的糖度与介电特性的关系的研究结果均与本文的糖度与介电特性的关系一致.

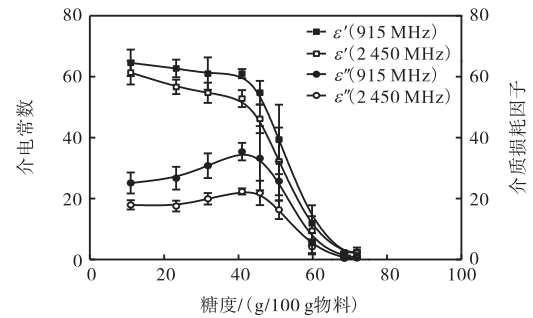


图 6 青萝卜干燥过程中糖度与介电特性的关系

Fig. 6 Relationship between sugar content and dielectric properties of green turnip in drying

## 2.6 密度与介电特性的关系

随着干燥的进行, 物料的密度会因内部结构的变化而发生变化, 因此密度可以是表征内部结构的参数. 由图 5 可知: 湿基含水率从 90% 降至 15% 时, 密度从  $0.99 \text{ g/cm}^3$  升至  $1.22 \text{ g/cm}^3$ , 这是因为含水率越低, 蛋白质、碳水化合物等大分子所占的比重越大, 它们的密度大于水, 所以密度增大. 这与郭文川等<sup>[28]</sup>对燕麦含水率与密度的关系以及顾园华等<sup>[29]</sup>对紫薯含水率与密度的关系研究结果一致. 图 7 显示, 随着密度不断增大, 介电常数逐渐减小, 介质损耗因子先增大, 后减小. 这与刘兴鹏<sup>[30]</sup>对烟叶密度与介电常数的关系研究结果一致.

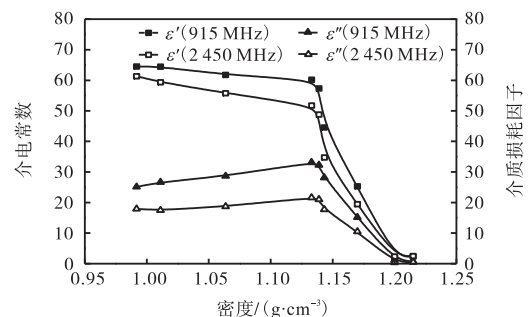


图 7 青萝卜干燥过程中密度与介电特性的关系

Fig. 7 Relationship between density and dielectric properties of green turnip in drying

## 2.7 模型的建立

### 2.7.1 含水率与介电特性的关联模型

根据上述研究, 在固定频率的情况下, 物料湿基含水率对介电特性的影响最大, 通过 Minitab 软件, 对含水率与介电常数、介质损耗因子之间进行逐步回归, 得出含水率与介电常数、介质损耗因子之间的关联模型, 并对关联模型进行方差分析. 方差分析表明, 各系数的  $P < 0.05$  (表 1), 说明介电常数和介质损耗因子对含水率的影响是极显著的. 从表 2 可得,

$R^2$ 、 $R^2$ (调整)、 $R^2$ (预测)之间的差距很小,均大于95%,说明模型是准确的. 含水率与介电特性的关联模型为

$$W_{915} = 0.1999 + 0.0134 \varepsilon' - 0.0093 \varepsilon'' \quad (2)$$

$$W_{2450} = 0.2093 + 0.0147 \varepsilon' - 0.0145 \varepsilon'' \quad (3)$$

表1 含水率与介电特性的回归模型方差分析

Tab. 1 Analysis of variance of regression model for moisture content and dielectric properties

方差来源	F 值	P 值
$\varepsilon'$ ( $f=915$ MHz)	758.07	0.000
$\varepsilon''$ ( $f=915$ MHz)	92.79	0.000
$\varepsilon'$ ( $f=2450$ MHz)	904.44	0.000
$\varepsilon''$ ( $f=2450$ MHz)	99.31	0.000

表2 含水率与介电特性的回归模型的  $R^2$  分析

Tab. 2 Analysis of  $R^2$  of regression model for moisture content and dielectric properties

频率/MHz	$R^2$	$R^2$ (调整)	$R^2$ (预测)
915	95.83%	95.68%	95.44%
2450	97.02%	96.92%	96.65%

2.7.2 糖度与介电特性的关联模型

同 2.7.1 方法,对糖度与含水率,糖度与介电常数、介质损耗因子之间进行逐步回归,得出糖度与含水率以及糖度与介电常数、介质损耗因子之间的关联模型,并对关联模型进行方差分析. 由表 3、表 4 可得:各系数的  $P < 0.05$ ,说明含水率、介电常数和介质损耗因子对糖度的影响是极显著的;并且介电常数的  $F$  值更大,说明介电常数对糖度的影响更大. 从表 5、表 6 可得, $R^2$ 、 $R^2$ (调整)、 $R^2$ (预测)之间的差距很小,且都大于 92%,说明糖度与含水率及糖度与介电特性的模型是准确的. 糖度与含水率的关联模型为

$$B = 84.14 - 78.08 W \quad (4)$$

糖度与介电特性的关联模型为

$$B_{915} = 70.51 - 1.58 \varepsilon' + 1.83 \varepsilon'' \quad (5)$$

$$B_{2450} = 70.19 - 1.48 \varepsilon' + 2.02 \varepsilon'' \quad (6)$$

表3 含水率与糖度的回归模型方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of regression model for moisture content and sugar content

方差来源	F 值	P 值
$W$	916.76	0.000

表4 糖度与介电特性的回归模型方差分析

Tab. 4 Analysis of variance of regression model for sugar content and dielectric properties

方差来源	F 值	P 值
$\varepsilon'$ ( $f=915$ MHz)	141.26	0.000
$\varepsilon''$ ( $f=915$ MHz)	50.83	0.000
$\varepsilon'$ ( $f=2450$ MHz)	72.29	0.000
$\varepsilon''$ ( $f=2450$ MHz)	18.55	0.005

表5 含水率与糖度的回归模型的  $R^2$  分析

Tab. 5 Analysis of  $R^2$  of regression model for moisture content and sugar content

$R^2$	$R^2$ (调整)	$R^2$ (预测)
98.81%	98.71%	98.37%

表6 糖度与介电特性的回归模型的  $R^2$  分析

Tab. 6 Analysis of  $R^2$  of regression model for sugar content and dielectric properties

频率/MHz	$R^2$	$R^2$ (调整)	$R^2$ (预测)
915	98.05%	97.40%	94.74%
2450	96.77%	95.69%	92.26%

2.7.3 密度与介电特性的关联模型

同 2.7.1 方法,对密度与含水率,密度与介电常数、介质损耗因子之间进行逐步回归,得出密度与含水率以及密度与介电常数、介质损耗因子之间的关联模型,并对关联模型进行方差分析. 由表 7 可得,各系数的  $P > 0.05$ ,且表 8 中  $R^2$ 、 $R^2$ (调整)、 $R^2$ (预测)之间的差距较大,说明含水率与密度的关系是不显著的,模型是不准确的. 由表 9 可得,各系数的  $P < 0.05$ ,且表 10 中的  $R^2$ 、 $R^2$ (调整)、 $R^2$ (预测)之间的差距很小,且都大于 95%,说明密度与介电特性的关联模型是准确的. 密度与含水率的模型为

$$\rho = 1.3156 - 0.8750 W + 1.7580 W^2 - 1.3520 W^3 \quad (7)$$

表7 含水率与密度的回归模型方差分析

Tab. 7 Analysis of variance of regression model for moisture content and density

方差来源	F 值	P 值
$W$	3.65	0.105
$W^2$	3.51	0.110
$W^3$	5.63	0.055

表8 含水率与密度的回归模型的  $R^2$  分析

Tab. 8 Analysis of  $R^2$  of regression model for moisture content and density

$R^2$	$R^2$ (调整)	$R^2$ (预测)
97.32%	95.98%	90.57%

密度与介电特性的关联模型为

$$\rho_{915} = 1.2081 - 0.0068 \varepsilon' + 0.0094 \varepsilon'' \quad (8)$$

$$\rho_{2450} = 1.2290 - 0.0099 \varepsilon' + 0.0074 \varepsilon'' + 0.0002 \varepsilon' \varepsilon'' \quad (9)$$

表9 密度与介电特性的回归模型方差分析

Tab. 9 Analysis of variance of regression model for density and dielectric properties

方差来源	F 值	P 值
$\varepsilon'$ ( $f=915$ MHz)	238.45	0.000
$\varepsilon''$ ( $f=915$ MHz)	96.14	0.000
$\varepsilon'$ ( $f=2450$ MHz)	235.59	0.000
$\varepsilon''$ ( $f=2450$ MHz)	35.65	0.001
$\varepsilon' \varepsilon''$ ( $f=2450$ MHz)	27.87	0.002

表 10 密度与介电特性的回归模型的  $R^2$  分析

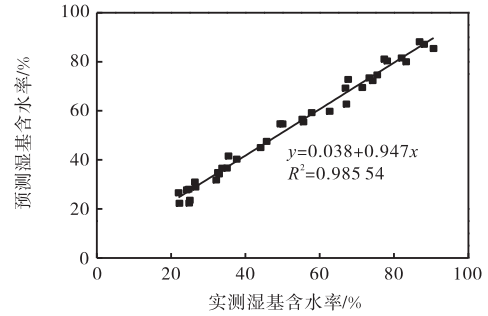
Tab. 10 Analysis of  $R^2$  of regression model for density and dielectric properties

频率/MHz	$R^2$	$R^2$ (调整)	$R^2$ (预测)
915	97.59%	96.90%	95.12%
2 450	99.21%	98.81%	97.62%

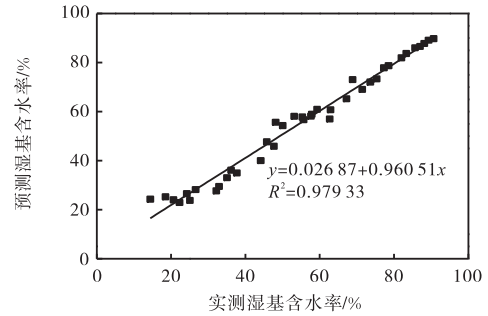
2.8 基于介电特性的青萝卜的含水率、糖度、密度的预测

为了进一步验证式(2)一式(6)、式(8)、式(9)方程的预测效果, 本文按照 1.2.5 的测量步骤再次测量 915 MHz 和 2 450 MHz 下不同含水率、糖度、密度的介电特性. 将测得的实验数据代入回归模型, 得出计算值, 将计算值与实测值进行对比. 由图 8 可知, 青萝卜的实际含水率与计算含水率的决定系数  $R^2$  大于 0.97, 含水率的预测误差较小, 说明用本文研究得到的含水率与介电特性的关联模型预测含水率是可行的. 由图 9 可得, 青萝卜的实际糖度与计算糖度的决定系数  $R^2$  大于 0.93, 糖度的预测误差较小, 说明用本文研究得到的糖度与含水率、糖度与介电特性的关联模型预测糖度也是可行的. 由图 10 可得, 青萝卜的实际密度与计算密度的决定系数  $R^2$  大于 0.90, 密度的预测误差较小, 说明用本文得到的密度与介电特性

的关联模型预测密度也是可行的.



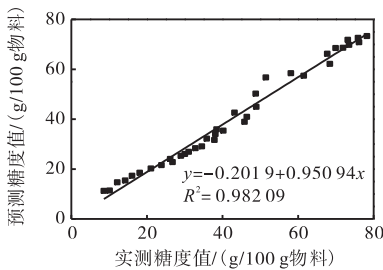
(a) 根据式(2)计算的关系图



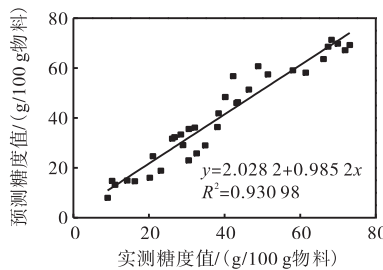
(b) 根据式(3)计算的关系图

图 8 湿基含水率计算值与实测值的关系图

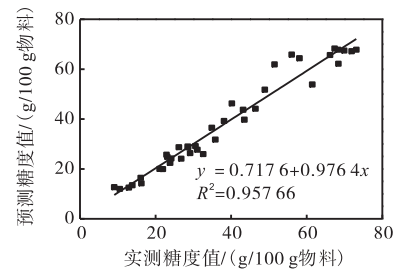
Fig. 8 Relationship between calculated value and measured value of moisture content



(a) 根据式(4)计算的关系图



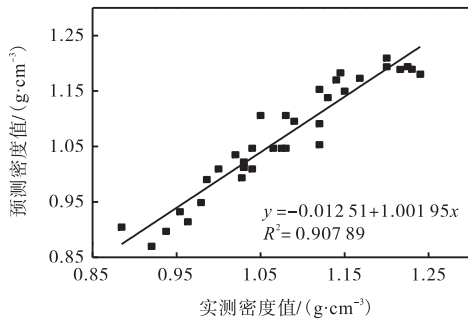
(b) 根据式(5)计算的关系图



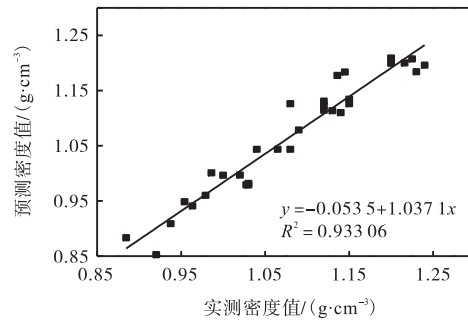
(c) 根据式(6)计算的关系图

图 9 糖度计算值与实测值的关系图

Fig. 9 Relationship between calculated value and measured value of sugar content



(a) 根据式(8)计算的关系图



(b) 根据式(9)计算的关系图

图 10 密度计算值与实测值的关系图

Fig. 10 Relationship between calculated value and measured value of density

### 3 结 论

本文在 60 °C 热风干燥条件下,对青萝卜干燥过程中的含水率、糖度、密度及介电特性进行测定,得出含水率与介电特性的关联模型为  $W_{915} = 0.1999 + 0.0134 \varepsilon' - 0.0093 \varepsilon''$ ,  $W_{2450} = 0.2093 + 0.0147 \varepsilon' - 0.0145 \varepsilon''$ ; 含水率与糖度的关联模型为  $B = 84.14 - 78.08 W$ ; 糖度与介电特性的关联模型为  $B_{915} = 70.51 - 1.578 \varepsilon' + 1.829 \varepsilon''$ ,  $B_{2450} = 70.19 - 1.484 \varepsilon' + 2.019 \varepsilon''$ ; 密度与介电特性的关联模型为  $\rho_{915} = 1.2081 - 0.0068 \varepsilon' + 0.0094 \varepsilon''$ ;  $\rho_{2450} = 1.2290 - 0.0099 \varepsilon' + 0.0074 \varepsilon'' + 0.0002 \varepsilon' \varepsilon''$ 。且经过方差分析以及模型验证表明,用介电特性预测干燥过程中的含水率、糖度、密度是可行的,用含水率预测糖度也是可行的。

本文对青萝卜在干燥过程中内部品质预测模型的建立,为开发基于介电特性在线、快速无损检测技术提供了一定的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 王超楠,王桂森,闻凤英,等. 天津“卫青萝卜”的营养保健功效及科学食用方法[J]. 天津农业科学,2012,18(4):140-142.
- [2] 潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007:511-517.
- [3] 宋春芳,王燕,张翰之,等. 基于微波加热的馒头介电特性的分析与研究[J]. 食品与生物技术学报,2017,36(5):466-472.
- [4] 郭文川. 果蔬介电特性研究综述[J]. 农业工程学报,2007,23(5):284-289.
- [5] 刘文超,廖宇兰,崔万春,等. 基于介电特性的水果无损检测技术的应用分析[J]. 食品研究与开发,2011,32(6):90-93.
- [6] 李尧,齐力娜,程裕东,等. 介电特性在食品品质检测中的研究进展[J]. 食品工业,2017,38(2):229-232.
- [7] 周世平,张海红,李海峰,等. 基于果品介电特性的无损检测技术研究综述[J]. 食品研究与开发,2015,36(1):131-134.
- [8] 张国坤. 基于介电特性的玉米叶片含水率无损检测研究[D]. 镇江:江苏大学,2016.
- [9] 柯大观. 基于介电特性的苹果无损检测系统研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2002.
- [10] 房丽洁,郭文川. 基于介电谱无损检测库尔勒香梨的糖度和硬度[J]. 现代食品科技,2016,32(5):295-301.
- [11] 袁子慧,廖宇兰,翁绍捷,等. 芒果介电特性与内部品质的关系[J]. 农机化研究,2011,33(10):111-114.
- [12] 秦文,陈宗道,羽仓羲雄,等. 食品的介电特性在食品干燥过程中的在线无损检测技术[J]. 食品与发酵工业,2005,31(8):52-55.
- [13] 王琴. 微波加热过程中食品物料介电特性检测研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [14] Changrue V, Orsat V, Raghavan G S V, et al. Effect of osmotic dehydration on the dielectric properties of carrots and strawberries[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(2):280-286.
- [15] Funebo T, Ohlson T. Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperature and moisture content[J]. Journal of Microwave Power, 1999, 34(1):42-54.
- [16] 张丽,宋曙辉,王文琪,等. 不同萝卜品种营养成分比较[J]. 北方园艺,2010(20):57-58.
- [17] 袁伟玲,崔磊,甘彩霞,等. 不同生食萝卜品质指标的评价分析[J]. 长江蔬菜,2017(12):27-29.
- [18] 郑先哲,汪春,贾富国. 农产品干燥理论与技术[M]. 北京:中国轻工业出版社,2009:9-12.
- [19] 宋春芳,袁冬明,王燕,等. 芋头的介电特性[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(2):153-158.
- [20] Van D D, Wang D I C, Goldblith S A. Dielectric loss factor of reconstituted ground beef: The effect of chemical composition[J]. Food Technology, 1969, 23(994):84-86.
- [21] 桑田,宋春芳,袁冬明,等. 基于微波干燥的黑莓介电特性研究[J]. 浙江农业学报,2016,28(2):345-351.
- [22] 李冬冬,贾柳君,张海红,等. 草莓介电特性和内在品质的关系[J]. 江苏农业科学,2018,46(2):120-123.
- [23] 屠鹏,边红霞. 基于电特性的苹果干燥品质检测[J]. 食品科学,2018,39(9):13-18.
- [24] 张毛赛,许静怡,祝易,等. 蔗糖和葡萄糖对南极磷虾肉糜介电特性的影响[J]. 食品工业科技,2017,38(4):58-64.
- [25] 郭文川,陈克克. 桃 10 ~ 4500 MHz 间的介电特性与内部品质关系分析[J]. 农业机械学报,2010,41(3):134-138.
- [26] Tulasidas T N, Raghavan G S V, Van F D V, et al. Dielectric properties of grapes and sugar solutions at 2.45 GHz[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 1995, 30(2):117-123.
- [27] 刘熠. 蜂蜜介电特性的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.



- [28] 郭文川,王婧,朱新华. 基于介电特性的燕麦含水率预测[J]. 农业工程学报,2012,28(24):272-279.
- [29] 顾园华,宋春芳,崔政伟. 基于温度和水分紫薯热物理特性与介电特性的分析[J]. 浙江农业学报,2015,27(1):97-103.
- [30] 刘兴鹏. 基于微波同轴谐振腔物料密度测量技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- 责任编辑:常涛,郎婧
- 
- (上接第34页)
- 2010,55(5):1102-1109.
- [3] 林善铤. 肾脏与高血压[J]. 中华内科杂志,1996(2):68-70.
- [4] 刘力生. 中国高血压防治指南 2010[J]. 中华高血压杂志,2011,19(8):701-743.
- [5] Listed N. Mortality after 16 years for participants randomized to the multiple risk factor intervention trial[J]. Circulation,1996,94(5):946-951.
- [6] Kawa J M, Taylor C G, Przybylski R. Buckwheat concentrate reduces serum glucose in streptozotocin-diabetic rats[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2003,51(25):7287-7291.
- [7] 惠丽娟. 荞麦及荞麦食品研究进展[J]. 粮食加工,2008,33(3):78-80.
- [8] 杨体模,荣祖元,许世跃,等. 金荞麦 E 抗肿瘤及抗炎作用的研究[J]. 四川生理科学杂志,1990(Z1):1-4.
- [9] Kim D W, Hwang I K, Lim S S, et al. Germinated Buckwheat extract decreases blood pressure and nitrotyrosine immunoreactivity in aortic endothelial cells in spontaneously hypertensive rats[J]. Phytotherapy Research,2009,24(1):993-998.
- [10] 周小理,赵琳.  $\gamma$ -氨基丁酸的生理功能及在食品中应用的研究进展[J]. 食品工业,2011,32(10):58-61.
- [11] 任清,张晓平,刘丫丫,等. 荞麦蛋白的提取及其酶解产物 ACE 抑制活性的研究[J]. 食品科技,2009,34(4):175-178.
- [12] Li C H, Matsui T, Matsumoto K, et al. Latent production of angiotensin I-converting enzyme inhibitors from buckwheat protein[J]. Journal of Peptide Science,2002,8(6):267-274.
- [13] Ma M S, Bae I Y, Lee H G, et al. Purification and identification of angiotensin I-converting enzyme inhibitory peptide from buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. Food Chemistry,2006,96(1):36-42.
- [14] Koyama M, Naramoto K, Nakajima T, et al. Purification and identification of antihypertensive peptides from fermented buckwheat sprouts[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry,2013,61(12):3013-3021.
- [15] Liu C L, Chen Y S, Yang J H, et al. Antioxidant activity of tartary (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.) and common (*Fagopyrum esculentum* Moench) buckwheat sprouts [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry,2008,56(1):173-178.
- [16] 张自强,赵东旭,杨新林. 羟脯氨酸的研究与开发[J]. 氨基酸和生物资源,2006,28(1):55-58.
- [17] 张宏伟,张永红,卢明俊,等. 食用荞麦对血糖、血脂及血压的影响[J]. 环境与职业医学,2003(2):120-122.
- [18] Ishizawa K, Izawa Y, Ito H, et al. Aldosterone stimulates vascular smooth muscle cell proliferation via big mitogen-activated protein kinase 1 activation[J]. Hypertension,2005,46(4):1046-1052.
- [19] Rauch J, O'Neill E, Mack B, et al. Heterogeneous nuclear ribonucleoprotein H blocks MST2-mediated apoptosis in cancer cells by regulating A-Raf transcription[J]. Cancer Research,2010,70(4):1679-1688.
- 责任编辑:郎婧