

李国鹏, 谢焕雄, 吴惠昌, 等. 果蔬干燥含水率在线测量技术研究现状及展望[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(24): 41–46.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.009

果蔬干燥含水率在线测量技术研究现状及展望

李国鹏, 谢焕雄, 吴惠昌, 颜建春, 魏海

(农业部南京农业机械化研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 果蔬干燥过程中的含水率是评价干燥设备运行状态和果蔬干燥质量的一个重要指标, 实时监测果蔬干燥过程中的含水率变化对优化控制工艺、把控干燥品质至关重要。以果蔬为对象, 在前人研究的基础上总结可用于果蔬含水率在线测量的若干方法, 包括利用介电特性、核磁共振技术、数学模型、高光谱成像技术、CT 技术、在线称质量等方法, 概述各种方法实现果蔬含水率测量的原理及研究进展, 并简述当前研究存在的不足与今后发展的方向。

关键词: 果蔬干燥; 含水率; 在线检测; 原理; 研究现状; 展望

中图分类号: TS255.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)24-0041-06

果蔬营养价值丰富, 是人体无机盐、纤维素、维生素等营养物质的主要来源。在农业生产中, 果蔬是除谷物以外最重要的农作物。大部分果蔬的含水率在 75% ~ 90%, 也有部分果蔬如黄瓜、生菜等含水率达 95% 以上^[1]。在微生物的作用下, 容易发生各种不良的物理化学变化而导致霉变^[2]。我国有着十分丰富的果蔬资源, 2015 年我国水果总产量达 27 375 万 t, 蔬菜种植总面积达 2 200 万 hm², 水果种植总面积达 1 281.7 万 hm², 并且呈逐年递增趋势^[3] (图 1)。对果蔬进行不同程度的深加工可提高果蔬的附加值, 果蔬干燥是果蔬加工的主要形式之一。对果蔬进行干燥可以延长果蔬的保存期, 减轻质量、缩小体积、便于运输^[4-6]。近年来, 我国果蔬干燥工业发展迅速, 已经成为提高农业效益、增加农民收入的重要行业, 在国际市场有着巨大的发展潜力^[7-8]。

1 果蔬含水率实时测量技术研究现状

含水率是衡量干燥程度和干燥效果的重要指标^[9]。通常有 2 种表达方式, 分为干基含水率与湿基含水率。干基含水率可以大于 1, 湿基含水率一定小于 1。

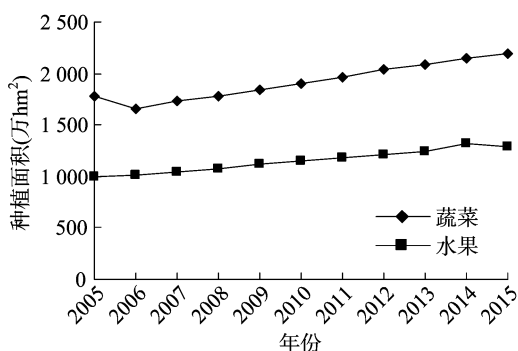


图1 我国果蔬种植面积

$$\text{干基含水率: } X_{\text{dry}} = \frac{m_{\text{water}}}{m_{\text{dry}}};$$

$$\text{湿基含水率: } X_{\text{water}} = \frac{m_{\text{water}}}{m_{\text{water}} + m_{\text{dry}}}。$$

式中: X_{dry} 表示干基含水率, %; X_{water} 表示湿基含水率, %; m_{water} 表示物料水分质量, kg; m_{dry} 表示物料干物质质量, kg。

果蔬含水率可以通过直接或间接测量获取。直接测量是通过减压干燥或共沸蒸馏等方式获取物料的水分质量 m_{water} 和干物质质量 m_{dry} 直接计算得出物质含水率^[10]。间接测量是利用物料自身的物理、化学、光学特性与含水率之间的关系来获得含水率^[11]。果蔬物料含水率在干燥过程中的实时测量对于干燥工艺过程的优化控制、判别干燥的进程以及把控干燥产品的品质等具有极其重要的意义。由于果蔬品种及物理性质的多样性, 要求其含水率的检测方法也具有多

收稿日期: 2017-08-09

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2017YFD0400905)。

作者简介: 李国鹏 (1994—), 男, 湖北汉川人, 硕士研究生, 主要从事农业装备技术研究。E-mail: greatlgp@163.com。

通信作者: 谢焕雄, 研究员, 主要从事农业机械设计及农产品加工装备。E-mail: xhxq@163.com。

理和品质的影响[J]. 山东农业科学, 2009, 41(10): 43–45.

[71] Sharma R R, Singh D, Singh R. Biological control of postharvest diseases of fruits and vegetables by microbial antagonists: a review [J]. Biological Control, 2009, 50(3): 205–221.

[72] Fan X, Mattheis J P. Bagging ‘Fuji’ apples during fruit development affects color development and storage quality [J]. HortScience, 1998, 33(7): 1235–1238.

[73] 黄明. 套袋防止梨小食心虫效果好[J]. 西南园艺, 1999, 27(2): 26.

[74] Buganic R D, Lizada C, De Ramos M B. Disease control in Philippine ‘carabao’ mango with pre-harvest bagging and postharvest hot water treatment [J]. Acta Horticulturae, 1997, 455: 797–804.

[75] 王建功, 陈厚彬, 周强, 等. 套袋对荔枝果实质量和农药残留的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 710–712.

[76] 刘建海, 李丙智, 张林森, 等. 套袋对红富士苹果果实品质和农药残留的影响[J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31: 16–18, 21.

样性^[12]。

1.1 利用果蔬介电特性的含水率测量

水果和蔬菜是介电物质中的一种,其介电特性与果蔬的组织成分有关,可以利用介电特性测量其含水率。在实际中,常用复相对介电常数(ε)来描述:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

式中: $j = \sqrt{-1}$; ε' 表示相对介电常数,是物料介电常数与真空介电常数 ε_0 的比值; ε'' 表示损耗因子^[13-15]。

1.1.1 国外研究现状 国外学者在果蔬介电特性方面的研究起步相对较早,1945 年 Dunlap 等就开始探索介电常数与含水率之间的关系方面,他们通过研究 18 kHz ~ 5 MHz 频率条件下胡萝卜的介电特性,表明介电常数主要取决于含水率^[16-18]。Stuchly 等在 9.4 GHz 频率下测定马铃薯粉在不同含水率和温度下的介电常数,表明介电常数与含水率成正比^[19-20]。Seaman 等在研究发现,在 150 MHz ~ 6.4 GHz 频率条件下苹果、香蕉、桃子和柑橘等的果皮和果肉的介电特性不同的主要是因为含水率不同^[21]。Nelson 测量了 3 种新鲜洋葱在 2.45、11.7、20.0 GHz 频率下的介电常数与介电损耗因子,认为这些数据可以用于含水率的测量^[22]。Tulasidas 等用开放式同轴探针技术测定了 2.45 GHz 频率下含水率在 15% ~ 80% 的葡萄在温度 25 ~ 80 °C 范围内的介电特性,研究发现介电常数与损耗因子随着含水率的减小而下降,在含水率较低时介电特性主要受温度影响^[23]。Funebo 等研究了 15 种果蔬在 2.45 GHz、5 ~ 130 °C 范围内的介电特性,得出了温度、灰分、含水率与介电常数之间的关系模型^[24]。Feng 等研究了 225、605 °C 的温度条件下,含水率在 4.0% ~ 87.5% 范围内的红富士苹果的介电特性,结果表明,在含水率较高(>70%)时,介电行为受自由水和离子传导影响。在中等含水率(23%)时,离子传导起主导作用。在含水量较低(4%)时,分散机理主要受结合水影响,含水率降低会导致介电常数与损耗因子减小^[25]。Sharm 等研究了大蒜在频率为 2.45 MHz、温度为 35 ~ 37 °C、干基含水率为 6% ~ 185% 下的介电特性,并通过响应面分析得出了含水率与介电特性、温度之间的预测模型^[26]。Nelson 研究了频率在 10 ~ 1.8 GHz、温度在 5 ~ 95 °C 范围内苹果、鳄梨和香蕉的复相对介电常数,结果表明,在 10 ~ 100 MHz 之间的某个频率下,介电常数受温度的影响最小,低于这个频率时,介电行为主要受离子传导影响,高于这个频率时,介电行为由电偶极子的状态决定^[27]。

1.1.2 国内研究现状 国内对果蔬介电特性的研究起步较晚,在国外学者研究的基础上,国内越来越多的相关学者开始对果蔬介电特性与含水率的关系进行研究。秦文等选取了 27 种农产品,其中包括 8 种谷物以及从水果类、食用菌类、根茎类、叶类中选取的 19 种果蔬产品,研究其介电常数与含水率的相关关系。研究结果表明,果蔬含水率与介电常数线性相关,但不同种类的果蔬线性相关的含水率范围不同。其中,白菜 60% ~ 95%,菠菜 40% ~ 95%,鸡腿菇 55% ~ 80%,双孢蘑菇 70% ~ 90%,马铃薯 58% ~ 78%,梨 60% ~ 91%,各类果蔬产品含水率与介电常数关系见图 2 至图 5^[28]。王颖等利用 LCR 测量仪测量了热风干燥过程中苹果以及苹果与空气混合物的相对介电常数,并对苹果相对含水率分别与相对介电常数、混合物相对介电常数进行回归分析,得出了相对含水率

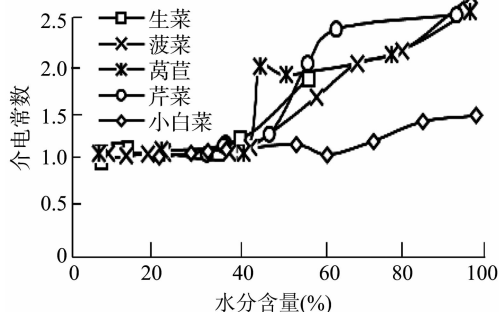


图2 叶类蔬菜含水率与介电常数的关系^[28]

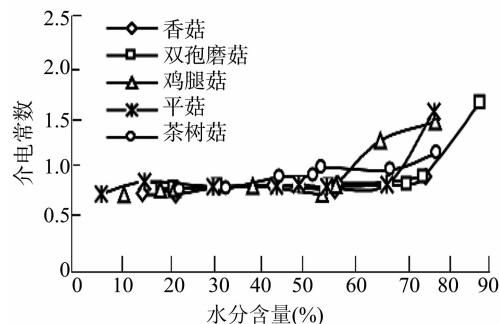


图3 食用菌类含水率与介电常数的关系^[28]

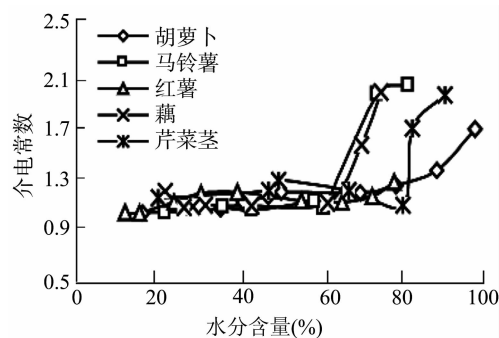


图4 根茎类蔬菜含水率与介电常数的关系^[28]

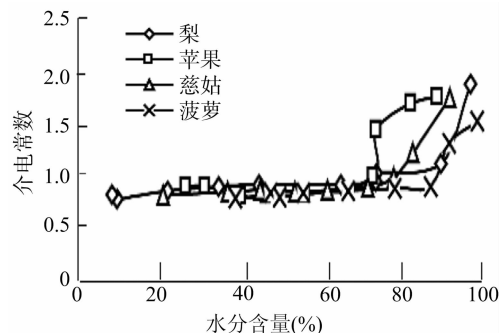


图5 水果类含水率与介电常数的关系^[28]

与相对介电常数之间的拟合方程。分析结果表明,苹果含水率与相对介电常数以及混合物的相对介电常数均极显著相关^[29]。针对常规的介电特性测试装置不能在真空冷冻干燥装置的冻干仓中对果蔬介电特性进行在线测量问题,张建华设计了 2 针型和 4 针型 2 种可调探针式电极,与 RCL 测试仪组合形成可调式电极介电特性测量系统^[30]。张鹤岭等针对真空冷冻干燥,利用温度传感器、电容传感器测量冷冻仓内的

温度以及物料的介电常数,结合 ZigBee 无线数据收发芯片设计了一款在线无线检测装置,用于实时监测冻干过程中的含水率^[31]。装置包括电容探针、电容检测模块以及 AD 转换器,分别在室温下使用 RCL 测试仪、在 70 ℃ 高温下使用平板电容对电容传感器进行性能评估,结果表明,室温下电容传感器相对误差小于 3%,高温下相对误差小于 0.5%。

目前,已有公司研制出了精度较高的通用型电容传感器,如 ADI 公司的 AD7746、Irvine Sensor 公司的 MS3110、AMG 公司的 CAV424 等,结合单片机测量精度可达 10^{-15} F。借助电容传感器可以方便且精确地测出果蔬物料的介电常数,使得该方法在操作上简单可行,经济性好。

1.2 利用核磁共振技术进行含水率测量

核磁共振(NMR)技术主要有 2 个学科分支,即磁共振成像(MRI)和磁共振波谱分析(MRS)。磁共振成像是用无线电射频脉冲作用于特殊磁场中的物料,使具有自旋特性的氢原子核吸收能量产生共振,脉冲停止后氢原子核以信号脉冲的形式释放能量,计算机将接受到的脉冲信号处理后获得图像。磁共振波谱分析是利用傅立叶公式将氢原子产生的脉冲信号转换成波谱进行分析的方法^[32]。在原子物理学中,原子从激发态转变为稳定态所需要的时间称为弛豫时间。横向弛豫时间(T_2)反映测试对象中水分自由度, T_2 反演谱信号幅值的总值代表该状态下物料的含水率。低场核磁共振(LF-NMR)是指磁场强度在 0.5 T 下的核磁共振,利用低场核磁共振检测物料中氢原子的横向弛豫时间 T_2 可获取水分信息,结合计算机视觉和图像处理技术可实现果蔬含水率的实时监测^[33-34]。

陈森等利用 LF-NMR 横向弛豫时间 T_2 反演谱研究了常温储存下樱桃的内部含水率变化,结果表明,樱桃内部主要存在 3 种状态的水,即自由水、不易流动的水、结合水^[35]。自由水的弛豫时间 T_2 为 100 ~ 1 000 ms,不易流动水为 20 ~ 100 ms,结合水为 1 ~ 20 ms。张绪坤等以胡萝卜为研究对象,采集样品在 40、50、60、70、80 ℃ 热风干燥过程中的 LF-NMR 横向弛豫时间 T_2 。分析 T_2 反演谱,对 NMR 总信号幅值与相应阶段的干基含水率进行回归分析,结果表明, T_2 反演谱总信号幅值与干基含水率存在显著相关性($r^2 = 0.999\ 1$)^[36]。徐建国等利用 MRI 技术,分别研究了 40、70 ℃ 恒温热风干燥过程中圆柱状胡萝卜的水分传递过程。结果表明,质子密度信号强度 I 与物料干基含水率存在显著的线性关系,用 Henderson-Pabis 模型 [$MR = a \exp(-kt)$] 模拟干燥过程,在 70 ℃ 时, $MR = 1.003e^{-0.011\ 14t}$, $r^2 = 0.999\ 4$; 40 ℃ 时, $MR = 1.005e^{-0.002\ 86t}$, $r^2 = 0.997\ 8$ ^[37]。王雪媛等利用低场核磁共振- T_2 反演谱研究了中短波红外干燥过程中苹果的水分变化,经过回归分析表明,NMR 总信号幅值与苹果的干基含水率存在良好的线性关系($r^2 = 0.912\ 3$) (图 6)^[38]。王森等利用 LF-NMR 成像技术,研究了柑橘汁包含水率与 T_2 反演谱峰值面积之间的关系(图 7),并对其相关性进行了 Pearson 检验,结果表明,结合水、自由水的含量与 T_2 反演谱峰值面积在 0.01 水平下显著相关,不易流动水在 0.05 水平下显著相关^[39]。

NMR 技术在获取物料水分信息时不与物料接触,可以减少对果蔬物料的污染,实现无损检测。此外,NMR 技术可以

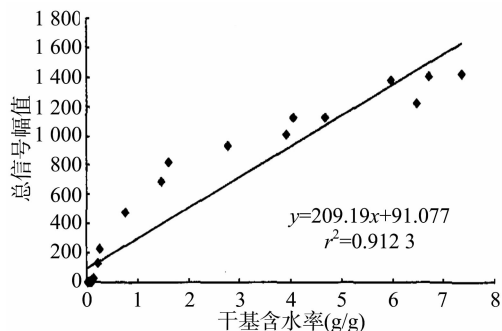


图6 干基含水率与总信号幅值拟合^[38]

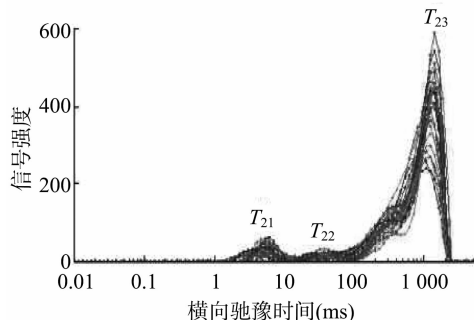


图7 T_2 反演谱^[39]

多方位、多层次成像,在原子水平上获取物料的全面信息。

1.3 利用数学模型预测含水率

1.3.1 模型种类 在食品干燥工业中的干燥工艺主要以薄层干燥或近似薄层干燥为主,薄层干燥是指干燥层厚度小于 20 mm,且被干燥物料表层充分暴露在相同状态干燥环境中的干燥过程^[40-41]。目前,有多种模型可以用来模拟农产品薄层干燥的过程,主要分为理论模型、半理论模型、经验模型和半经验模型。

理论模型是在假定扩散系数 D 与浓度无关的条件下,由非稳态扩散过程中的菲克第二定律推而来。

菲克第二定律:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

推导得出理论模型:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e};$$

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \times \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L_0} \right]$$

式中: C 表示浓度,%; t 表示扩散时间,s; x 表示扩散距离,m; MR 表示水分比,%; X 为物料的实时含水率,%; X_e 为平衡含水率,%; X_0 为物料初始含水率,%; L_0 表示干燥物料厚度的 1/2,m。理论方程形式复杂,难以实际应用,后有学者在模型中引入经验常数将上式进行简化,得到了半理论模型。Henderson 等于 1961 年简化得到 Henderson and Pabis 模型:

$$MR = a \exp(-kt)。$$

式中: a 、 k 均为经验常数。

经验模型是将干燥过程中的物料的含水率与时间进行回归分析直接得出的关系式方程。Thompson 等于 1968 年提出了 Thompson 模型:

$t = a \ln(MR) + b[\ln(MR)]^2。$

半经验模型是在 Lewis 模型 $MR = \exp(-kt)$ 基础上,通过大量的干燥动力学试验分析建立起来,具有较高的精度,如 Page 模型^[42]:

$MR = \exp(-kt^n)。$

表 1 薄层干燥数学模型

序号	模型类别及名称	干燥方程
1	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
2	Two-term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$
3	Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
5	Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kat)$
6	Diffusion approach	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
7	Verma	$MR = a \exp(-kt)(1-a) \exp(-gt)$
8	Simplified Fick's diffusion equation	$MR = a \exp[-k(t/L^2)]$
9	Lewis(或 Newton)	$MR = \exp(-kt)$
10	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
11	Modified page(I)	$MR = \exp[-(kt)^n]$
12	Modified page(II)	$MR = a \exp(-kt^n)$
13	Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
14	Demir	$MR = a \exp(-kt^n) + b$
15	Weibull	$MR = \exp[-(t/a)^b]$
16	Wangh and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
17	Thompson	$t = a \ln MR + b(\ln MR)^2$
18	Weibull distribution	$MR = a - b \exp(-kt^n)$

1.3.2 物料薄层干燥数学模型国内研究进展 众多国内外学者利用数学模型对果蔬干燥过程进行模拟,预测干燥过程中果蔬的含水率变化。张黎骅等使用 Henderson and Pabis 模型、Lewis 模型和 Page 模型对花椒的微波干燥过程进行模拟,结合 SAS 软件对模型拟合度进行显著性检验,结果表明,采用 Henderson and Pabis 模型描述花椒微波干燥过程更为准确($r^2 = 0.988\ 1$)^[44]。汪政富等研究了温室晾房和黑纱晾房中葡萄的薄层干燥特性,选用 10 种模型分别对 2 种晾房中葡萄的干燥过程进行模拟,结果表明,Wang-Singh 模型的拟合效果最佳($r^2 = 0.997$)^[45]。邓彩玲等研究了龙眼在不同温度和不同风速下的热泵干燥特性,使用 Lewis 模型、Henderson and Pabis 模型、Page 模型、Midilli 模型等 10 种模型对龙眼的热泵干燥过程进行模拟,分析结果表明,各干燥条件下,Midilli 模型龙眼热泵干燥过程的拟合效果最佳($r^2 = 0.997\ 0$)^[46]。同时采用二次多项式对 Midilli 模型种的经验常数 $a、b、k、n$ 进行拟合,确立了不同温度和风速条件下的拟合方程,对模型进行验证发现预测值与各试验数据在 0.01 水平下显著相关,说明该模型可以对龙眼在任意温度、任意风速条件下的热泵干燥过程进行模拟。张凡选用了 8 种模型分别对生姜片和糖姜片的热风干燥、微波干燥和热风微波联合干燥过程进行拟合,用 $r^2、\chi^2$ 、均方根误差(RMSE)3 个参数对模型的拟合结果进行评价。研究结果表明,在生姜片的热风干燥和微波干燥过程中均为 Midilli 模型的拟合效果最好,在联合干燥过程中前期 Midilli 模型的拟合效果最好,后期 Two-term 模型的拟合效果最好^[47]。在糖姜片的热风干燥过程中 Logarithmic 模型拟合效果最好,在微波干燥过程中 Page 模型拟合效果最好,在联合干燥过程中前期 Page 模型的拟合效果最好,后期 Midilli 模型的拟合效果最好。采用二次多项式对模型中的各参数进行拟合求解,得出了最终的干燥模型,并通过试验对各模型吻

物料种类、干燥条件等因素的变化会直接影响到模型的精度,一个足够精确的模型可以准确地描述特定干燥条件下物料的干燥过程,预测物料的实时含水率。因此,模型选择至关重要^[43]。笔者根据相关文献[42-43]总结了 18 种薄层干燥的数学模型(表 1)。

合度进行验证,发现试验数据与各模型的预测值均高度吻合,说明模型可以准确描述生姜片和姜糖片的各个干燥过程,预测干燥过程中的含水率。弋晓康等选用了 10 种数学模型对红枣的热风干燥过程进行拟合,选用决定系数 $r^2、\chi^2$ 、均方根误差来评估拟合效果,研究发现 10 种数学模型在 45~65℃ 温度范围内的拟合效果从高到低依次为 Weibull distribution 模型、Modified Page II 模型、Logarithmic 模型、Page 模型、Modified Page I 模型、Two-term 模型、Henderson and Pabis 模型、Wang and Singh 模型、Lewis 模型、Thompson 模型,在 0.5~1.0 m/s 风速范围内拟合效果从高到低为 Weibull distribution 模型、Modified Page II 模型、Logarithmic 模型、Wang and Singh 模型、Page 模型、Modified Page I 模型、Henderson and Pabis 模型、Two-term 模型、Lewis 模型、Thompson 模型^[48]。

1.3.3 物料薄层干燥数学模型国外研究进展 Dhanushkodi 等通过试验研究了太阳生物质能混合干燥机中腰果的干燥特性,采用 15 种数学模型拟合干燥过程。结果表明,在混合干燥过程中,Page 模型对物料薄层干燥过程拟合效果最好($r^2 = 0.997\ 8, \chi^2 = 0.001\ 7, RMSE = 0.024\ 7$)。Two-term 模型对太阳能薄层干燥过程中模型拟合效果最好($r^2 = 0.997, \chi^2 = 0.001\ 6, RMSE = 0.023\ 1$),Page 模型对生物质能干燥过程拟合效果最好($r^2 = 0.997, \chi^2 = 0.001\ 6, RMSE = 0.023\ 4$)^[49]。Sharma 等研究了红外干燥过程中洋葱的干燥特性,选用 8 种模型对干燥过程进行拟合,结果表明,Page 模型对洋葱的红外干燥过程模拟效果最好($r^2 = 0.999, \chi^2 = 1.33 \times 10^{-4}$),可对洋葱干燥过程进行准确描述,预测洋葱红外薄层干燥过程中的含水率^[50]。Doymaz 研究了红外干燥过程中番茄的干燥特性,使用 9 种模型拟合干燥过程,发现 Midilli 模型拟合效果最好,有效扩散系数 D 在 $2.66 \times 10^{-9} \sim 5.17 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

范围内受红外线功率影响显著^[51]。

数学模型法利用物料干燥过程中含水率与时间之间的函数关系,可以预测未来某一时间点的含水率情况。同时也可以根据物料干燥终点的含水率计算出所需要的干燥时间,合理安排干燥工艺。

2 其他方法在果蔬含水率测量中的应用

2.1 高光谱成像技术在果蔬含水率测量中的应用

高光谱成像技术是指在连续波长下获取样本图像,组成高光谱图像。原始高光谱图像是一个由众多连续子图像组成的三维数据立方,每个像素都代表了样本特定位置的光谱信息。高光谱图像可以反映样本的内外部特征以及氢键成分信息,利用高光谱成像技术能对样本进行可视化分析^[52]。

Huang 等应用高光谱成像技术研究大豆干燥过程中含水率和颜色的变化规律,在波长为 400 ~ 1 000 nm 的光谱区域获取了 270 个不同干燥程度的大豆样本高光谱反射图像,使用最小二乘法建立回归模型用于预测大豆的含水率和颜色。分析结果表明,应用高光谱成像技术预测干燥过程中的大豆颜色与含水率具有可行性^[53]。洪添胜等利用高光谱成像技术获取雪梨中的糖和水分信息,建立含糖量和含水率的预测模型。分析结果表明,含糖量模型预测值与实际值的相关系数 $r^2 = 0.996$,含水率模型预测值与实际值的相关系数 $r^2 = 0.94$ ^[54]。

2.2 CT 技术在果蔬含水率测量中的应用

电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)是利用 X 射线(X-CT)、 γ 射线(γ -CT)、超声波(UCT)等与高灵敏度的传感器相结合,围绕着被测物体的某个部位作连续断面扫描,获取内部信息。

Tollner 等利用 X-CT 研究了不同含水率的红富士苹果对 X 射线的吸收率,结果表明,苹果内部断面对 X 射线的吸收强度与含水率显著相关^[55]。张京平等利用 X-CT 技术和图像处理技术研究了苹果内部含水率与对应点 CT 值(X 射线特征值)之间、图像 RGB 值与 CT 值之间的关系,发现含水率与 CT 值、图像 RGB 值与 CT 值之间存在显著线性相关性,说明可以通过 CT 图像实现果蔬含水率在线检测^[56]。孙腾以苹果产地、贮藏时间、CT 值作为参数,通过响应面分析建立了三者与苹果含水率之间的预测模型。对比分析表明,含水率预测值与实际值之间的相关系数 $r = 0.902\ 9$, $RMSE = 0.494\ 9$ ^[57]。

2.3 利用称质量法测量果蔬干燥含水率

利用物料干燥过程中干物质质量不变的原理,在初始含水率 X_{water} 和初始质量 m 已知的前提下,实时采集物料干燥过程中的总质量,可以实现物料含水率的在线测量。

实时含水率计算公式:

$$m_0 = m - mX_{\text{water}};$$

$$X_{\text{water}-t} = \frac{m_t - m_0}{m_t}.$$

式中: m_0 为干物质质量,kg; m_t 为实时物料总质量,kg; $X_{\text{water}-t}$ 为物料实时湿基含水率,%。

崔清亮等利用上述原理针对冷冻干燥过程设计了冻干物料含水率在线测量系统。试验验证表明,该系统含水率测量值与真实值误差小于 5%^[58]。

3 存在问题与展望

3.1 各种测定方法在实际应用中存在的问题

大量研究结果表明,利用介电特性、核磁共振技术、数学模型、高光谱成像技术、CT 技术、在线称质量等方法可以实现果蔬干燥含水率在线检测,但在实际应用中仍存在的问题。

通过测量果蔬的介电常数获取果蔬含水率的方法在操作上简单,但果蔬物质的介电常数受温度影响较大,在温度变化较大的干燥箱中须要进行温度补偿,易产生误差^[59]。CT 与核磁共振设备成本高,操作相对复杂,在附加值相对较低的果蔬干燥行业中很难被广泛使用。数学模型法主要适用于物料的薄层干燥过程,对于非薄层干燥或非近似薄层干燥的物料干燥过程适用性较差。在线称质量法在计算果蔬干燥过程中的含水率时须要知道初始含水率、初始质量,操作复杂过程繁琐。

3.2 发展方向

关于果蔬含水率实时测量技术的现有研究成果主要体现在理论方法上,利用研究成果开发出的实时测量设备还比较罕见。要加快科技成果转化,将科学技术真正转化为生产力,促进果蔬干燥行业发展。

众多研究主要集中在单个方法上,针对上述各种含水率测量方法存在的优缺点,可以选择适当的方案进行有机组合,实现优势互补,保证测量结果的准确性。例如将介电特性测量技术与在线称质量方法相结合,实现初始含水率、初始质量以及实时含水率的一体化测量。

参考文献:

- [1]潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,2007:763-765.
- [2]罗云波,蔡同一,生吉萍,等. 园艺产品贮藏加工学(加工篇)[M]. 北京:中国农业大学出版社,2001:2-18.
- [3]国家统计局. 2016 年中国统计年鉴[M]. 北京:国家统计局出版社,2016.
- [4]单 杨. 中国果蔬加工产业现状及发展战略思考[J]. 中国食品学报,2010,10(1):1-9.
- [5]孙 芳,江水泉. 我国果蔬干燥加工技术现状及发展前景[J]. 粮食与食品工业,2016,23(4):11-15,20.
- [6]陆 燕. 干燥过程气体成分对蔬菜干制品质的影响[J]. 农业工程学报,2004,20(4):188-191.
- [7]安 瑜. 果蔬干燥新技术及存在的问题[J]. 食品工程,2013(2):9-11.
- [8]沈卫强. 果蔬干燥新技术及应用前景[J]. 农机化研究,2009,31(12):236-238.
- [9]Mireei S A, Bagheri R, Sadeghi M A. Developing an electronic portable device based on dielectric power spectroscopy for non-destructive prediction of date moisture content [J]. Sensors and Actuators A-Physical,2016,247:289-297.
- [10]中华人民共和国商业部. 水果、蔬菜产品中干物质和水分含量测定方法:GB 8858—1988[S]. 北京:中国标准出版社,1988.
- [11]陈 斌,黄星奕. 食品与农产品品质无损检测新技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004:29-30.
- [12]张立彬,胡海根,计时鸣,等. 果蔬产品品质无损检测技术的研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(4):176-180.
- [13]Nelson S O. Electrical properties of agricultural products: a critical

- review[J]. Transactions of the ASAE,1973,16(2):384-400.
- [14]王瑞庆,冯建华,徐新明,等. 果蔬电学特性的测试技术及影响因素研究进展[J]. 食品科学,2012,33(19):321-325.
- [15]Tran V N, Stuchly S S, Kraszew S A. Dielectric properties of selected vegetables and fruits 0.1~10.0 GHz[J]. The Journal of Microwave Power,1984,19(4):251-258.
- [16]Dunlap W C, Makower B. Radio-frequency dielectric properties of dehydrated carrots[J]. Journal of Physical Chemistry, 1945, 49(6):601-622.
- [17]秦文. 蔬菜物料的介电特性及其应用研究[D]. 重庆:西南大学,2006:13-14.
- [18]王政. 基于介电特性的植物油品质快速检测技术的研究[D]. 雅安:四川农业大学,2009.
- [19]Stuchly S S. Dielectric properties of some granular solids containing water[J]. The Journal of Microwave Power,1970,5(2):62-68.
- [20]陈克克. 水果介电特性及其与品质关系的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [21]Seaman R, Seals J. Fruit pulp and skin dielectric properties for 150 MHz to 6 400 MHz[J]. Journal of Microwave Power,1991,26(2):72-81.
- [22]Nelson S O. Microwave dielectric properties of fresh onions[J]. Transactions of the Asae,1992,35(3):963-966.
- [23]Tulasidas T N, Raghavan G S, van de Voort F, 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.
- [24]Funebo T, Ohlsson T. Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperature and moisture content[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy,1999,34(1):42-54.
- [25]Feng H, Tang J, Cavalieri R P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature[J]. Transaction of the ASAE,2002,45(1):129-135.
- [26]Sharma G P, Prasad S. Dielectric properties of garlic (*Allium sativum* L.) at 2 450 MHz as function of temperature and moisture content[J]. Journal of Food Engineering,2002,52(4):343-348.
- [27]Nelson S O. Radio-frequency and microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetables[J]. Soils & Foundations,2003,23(5):1-10.
- [28]秦文,张惠,邓伯勋,等. 部分农产品水分含量与其介电常数关系模型的建立[J]. 中国食品学报,2008,8(3):62-67.
- [29]王颖,郭玉明. 苹果干燥过程介电常数与干燥性质相关性研究[C]. 2010 国际农业工程大会提升装备技术水平,促进农产品、食品和包装加工业发展分会场论文集,2010.
- [30]张建华. 可调探针式电极的设计与试验研究[D]. 晋中:山西农业大学,2014.
- [31]张鹤岭,郭玉明,张建华. 果蔬冻干水分在线无线监测装置设计与试验[J]. 农机化研究,2016,38(5):92-106.
- [32]黄亚伟,张令,王若兰,等. 核磁共振技术在果蔬中的应用研究进展[J]. 食品工业,2015,36(12):237-240.
- [33]胡潇予,蓝蔚青,张楠楠,等. 低场核磁共振技术在食品领域中的研究进展[J]. 食品工业科技,2017(6):386-390,396.
- [34]李晓斌. 运用图像处理技术在线监测真空冻干果蔬含水率[D]. 晋中:山西农业大学,2013.
- [35]陈森,孟兆磊,陈闰堃,等. 樱桃水分变化的低场核磁共振[J]. 实验室研究与探索,2013,32(8):52-54.
- [36]张绪坤,祝树森,黄俭花,等. 用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程
- 的内部水分变化[J]. 农业工程学报,2012,28(22):282-287.
- [37]徐建国,徐刚,张绪坤,等. 利用核磁共振成像技术分析胡萝卜干燥过程中内部水分传递[J]. 农业工程学报,2013,29(12):271-276.
- [38]王雪媛,高琨,陈芹芹,等. 苹果片中短波红外干燥过程中水分扩散特性[J]. 农业工程学报,2015,31(12):275-281.
- [39]王森,张晶,贺妍,等. 基于低场核磁共振的柑橘汁胞粒化评级[J]. 农业工程学报,2016,32(7):290-295.
- [40]石启龙,赵亚,李兆杰,等. 竹莴鱼热泵干燥数学模型研究[J]. 农业机械学报,2009,40(5):110-114.
- [41]关志强,王秀芝,李敏,等. 荔枝果肉热风干燥薄层模型[J]. 农业机械学报,2012,43(2):151-158,191.
- [42]王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备,2009,7(2):51-56.
- [43]Babalís S J, Papanicolaou E, Kyriakis N, et al. Evaluation of thin-layer drying models, for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*) [J]. Journal of Food Engineering,2006,75(2):205-214.
- [44]张黎骅,张芳,赵超. 花椒微波干燥数学模型的试验研究[J]. 农机化研究,2008(12):104-106,109.
- [45]汪政富,李玲玲,胡小松,等. 两种不同晾房中无核白葡萄薄层干燥的数学模型[J]. 农机化研究,2008(5):28-31.
- [46]邓彩玲,林美,徐玉娟,等. 龙眼热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 食品工业科技,2013,34(12):115-121,125.
- [47]张凡. 姜片的微波与热风联合干燥工艺及动力学研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [48]弋晓康. 红枣热风干燥特性及品质试验研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
- [49]Dhanushkodi S, Wilson V H, Sudhakar K. Mathematical modeling of drying behavior of cashew in a solar biomass hybrid dryer[J]. Resource-Efficient Technologies,2017,3(4):359-364.
- [50]Sharma G P, Verma R C, Pathare P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering,2005,71(3):282-286.
- [51]Doymaz I. Mathematical modeling of drying of tomato slices using infrared radiation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014,38(1):389-396.
- [52]赵伟彦. 果蔬干燥过程中的品质无损检测技术研究[D]. 无锡:江南大学,2015.
- [53]Huang M, Wang Q G, Zhang M, et al. Prediction of color and moisture content for vegetable soybean during drying using hyperspectral imaging technology[J]. Journal of Food Engineering, 2014,128(1):24-30.
- [54]洪添胜,乔军, Wang N, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报,2007,23(2):151-155.
- [55]Tollner E W, Yc H. Relating X-ray absorption to density and water content in apples[J]. ACS Chemical Biology,1992,35(6):1921-1928.
- [56]张京平,彭争,汪剑. 苹果水分与 CT 值相关性的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2):180-182.
- [57]孙腾. CT 技术及图像变换对苹果内部品质的无损检测模型研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [58]崔清亮,郭玉明,郑德聪. 冷冻干燥物料水分在线测量系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(4):91-96.
- [59]张鹤岭,郭玉明. 温度对果蔬介电特性影响的试验研究——基于无线装置[J]. 农机化研究,2015(10):197-200.