

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

徐建国¹, 徐刚¹, 张绪坤², 顾震¹, 张森旺¹, 李华栋^{1*}

(1. 江西省科学院食品工程创新中心, 南昌 330029; 2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘要: 为可视化果蔬干燥过程中内部水分传递现象, 利用低场核磁共振成像技术 (magnetic resonance imaging, MRI) 研究了圆柱状胡萝卜 40、70℃热风干燥过程中内部水分传递过程, 获得了物料收缩状态下水分廓线特征和变化规律。研究表明, 干燥过程中, 胡萝卜样品的水分廓线沿径向、轴向同时向中心不规则收缩, 其内部的水分传递是一个多维、非稳态传递过程, 并具有 non-Fickian 传递特征; 干燥初始, 水分梯度在物料表面迅速形成。随着干燥的进行, 物料干基含水率低于 7.33 kg/kg 时, 其湿区直径收缩比率大于实测直径收缩比率, 表面成为“干区”, 干湿界面退缩到物料内部。圆柱状胡萝卜的热风干燥过程可以用 Henderson-Pabis 模型进行描述, 所建水分传递模型可以很好地模拟 70℃干燥试验结果, 最大相对误差为 7.69%, 出现在干燥最后阶段, 其他时刻相对误差低于 4%; 物料中心层水分传递模型可以很好地预测 40℃干燥试验过程。研究结果可以为干燥工艺的选择以及物料收缩状态下水分传递过程的理论模拟提供支持。

关键词: 核磁共振成像, 水分, 干燥, 水分廓线, 水分传递, 收缩

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.12.034

中图分类号: TQ018

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-12-0271-06

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.

Xu Jianguo, Xu Gang, Zhang Xukun, et al. Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 271-276. (in Chinese with English abstract)

0 引言

物料干燥通常是通过加热湿物料, 使水分汽化的过程^[1]。在这个过程中, 水分和热量耦合传递。热敏性果蔬具有多孔、向异性细胞结构^[2], 含水率高。这类物料的干燥过程常伴有依赖水分发生的生物、物理、化学反应, 使得物料收缩、表面硬化、有效(或营养)成分降解, 造成产品质量下降^[3-4]; 而且干燥过程中物料内部出现的水分不均匀现象会影响到最终产品质量和过程能耗^[5]。因此, 了解物料内部水分传递过程对生产高质量的产品、节约过程能耗有重要意义。

果蔬干燥过程中内部的水分分布可以通过物理切片法来获得。但这种方法的缺点是对物料有破坏性, 并且很难精确切片, 试验结果精度不高^[6]。现已有文献利用非接触、非破坏性试验方法, 如 H 核磁共振 (nuclear magnetic resonance, NMR) 技术,

主要是用弛豫时间和成像技术^[7], 成功获取了物料内部水分分布信息^[8-10]。张绪坤等^[9]利用低场核磁共振的横向弛豫时间分析了胡萝卜切片在干燥过程中不同形态水分的变化; Frias J M 等^[11]利用高场核磁共振成像技术 (magnetic resonance imaging, MRI) 获得了水稻在干燥过程中的水分廓线, 研究了物料内部水分扩散系数的变化; Prabal K. Ghosh 等^[12]利用自旋回波 (spin echo, SE) 磁共振成像技术获得了小麦种子干燥过程中水分分布图像, 并利用图像信息研究了干燥动力学。因此, 作为可视化水分传递过程的重要工具, 核磁共振图像在提供物料内部结构信息的同时^[13-14], 还可以表达物料内部水分廓线特征和变化规律。这些信息对于认识和发展物料干燥过程中湿热传递理论十分必要。

本文利用低场 MRI 系统获取新鲜胡萝卜片在干燥过程中的质子密度图像, 研究物料在干燥过程中水分廓线特征和分布, 为干燥工艺的选择以及理论模拟水分传递过程提供试验支持。

1 材料与方法

1.1 试验设备

MiniMR-60 磁共振成像仪 (0.51T, 上海纽迈电子科技有限公司); 叶拓 101 系列恒温干燥箱 (上海叶

收稿日期: 2013-01-21 修订日期: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (31060231)

作者简介: 徐建国 (1979-), 男, 山东青州人, 助理研究员, 主要从事干燥技术与设备研究。南昌 江西省科学院食品工程中心, 330029。

Email: chem_food@hotmail.com

*通信作者: 李华栋 (1960-), 男, 教授, 博士, 主要从事食品工程研究。南昌 江西省科学院食品工程中心, 330029。

Email: hdljt@yahoo.cn

拓仪器仪表有限公司)；FA2004 电子天平(精度为 1 mg, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司)；温湿度传感器(B 级, 武汉市仪器仪表研究所)；游标卡尺(精度为 0.02 mm, 杭州钱塘江工具量具有限公司)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品制备

新鲜胡萝卜(日本红勇人 2 号)购于当地农贸市场, 清洗后, 晾干表面水分。去掉胡萝卜头部、利用模具将胡萝卜中部制成规格约为 $\Phi 26 \text{ mm} \times (10 \pm 0.1) \text{ mm}$ 的圆柱状样品, 以保证在相同 NMR 成像参数下, 获得具有较高分辨率的样品图像。同时, 较大尺寸、圆柱状的样品相对薄片状样品可以减少物料收缩、变形, 便于成像观察。另外, 试样做上、下方向标记, 以保证 NMR 图像在空间的一致性。

1.2.2 干燥试验

干燥温度对果蔬物料的干燥质量影响显著。因此, 本试验干燥温度选择在中低温。将制备好的样品置于烘箱中, 分别在 40、70℃ 的环境中进行干燥。并分别在 40℃ 干燥时每隔 1 h、70℃ 干燥时每隔 0.5 h 取样进行称质量、尺寸测量(直径 D 和厚度 L)、核磁共振成像, 直至物料湿基含水率为 10%。物料初始含水率 (M_0) 通过 105℃ 烘干法测得^[15]。相同试验, 重复 2 次。新鲜样品的初始湿基含水率为 91.07%。

NMR 成像时, 成像时间通常在 5~20 min, 可以忽略该时间内物料水分为达到水平平衡而发生的再分布现象。

1.2.3 MRI 成像

在不同干燥时间取试样, 放入 MiniMR-60 射频线圈中心位置, 用硬脉冲 FID 序列调节中心频率, 利用自旋回波序列获得物料质子密度图像。图像上的每点信号强度 I 可由下式描述^[16]

$$I \propto S \cdot [1 - \exp(-TR/T1)] \cdot \exp(-TE/T2) \quad (1)$$

式中, I 表示该点信号强度, a.u.; S 表示质子密度, a.u.; TE 表示回波时间, ms; $T1$ 表示纵向弛豫时间, ms; $T2$ 表示横向弛豫时间, ms; TR 表示重复时间, ms。因此, 通过延长重复时间 TR 值和缩短回波时间 TE 值可以获得质子密度加权图像。成像试验主要参数为: $TR=5000 \text{ ms}$; 矩阵 256×256 ; 接收带宽 $SW=20 \text{ kHz}$; 重复次数 $NS=4$; 根据 CPMG (carr-purcell-meiboom-gill) 序列测得的 $T2$ 值, 选择 $TE=130 \text{ ms}$ 进行成像, 采集数据。同时, 通过调整 SE 序列中的选层梯度、相位编码剃度和频率编码梯度, 分别获取样品径向(选层厚 26 mm)、轴向(选层厚 10 mm)成像数据。

上述试验每次测量时重新调整射频偏移频率, 使射频中心频率与磁体频率一致。

1.3 数据处理与模型检验

利用 Matlab7.0 对采集的质子密度信号进行 2D 傅立叶转换可得到 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 图像灰度图; 反之利用 Matlab7.0 的 Figure 工具箱对图像处理, 可以获得样品图像某处的质子密度信号强度。

利用相对误差法评估模型优劣^[17]。相对误差 E 由下式计算

$$E = \sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{M_{\text{exp},i} - M_{\text{pre},i}}{M_{\text{exp},i}} \right| \right) \quad (2)$$

其中, $M_{\text{exp},i}$ 为试验测量的干基含水率, kg/kg; $M_{\text{pre},i}$ 为干基含水率预测值, kg/kg。

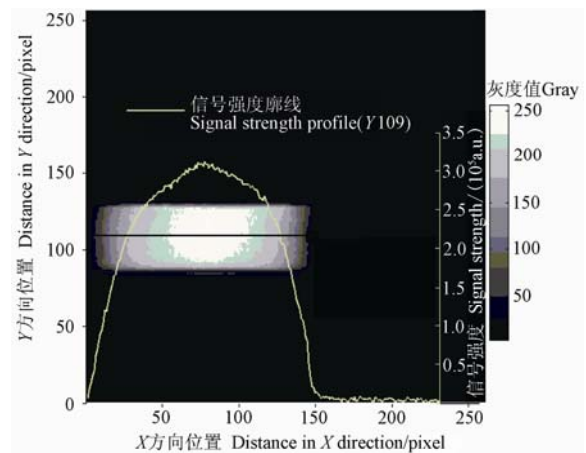
其他试验数据利用 Matlab7.0 编程处理。

2 结果与分析

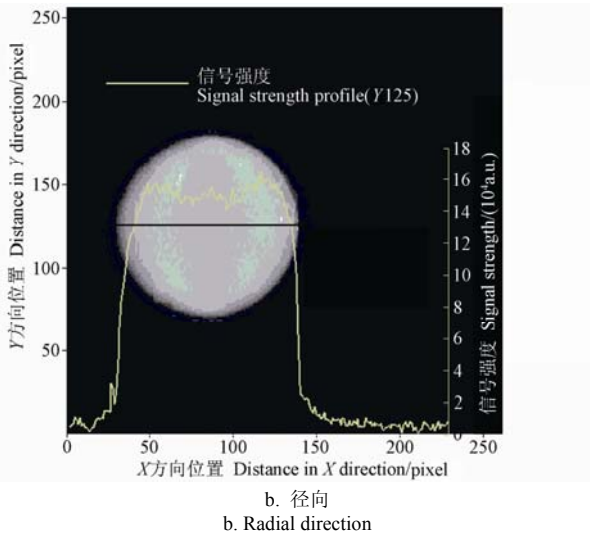
2.1 干燥过程对胡萝卜样品内部水分传递的影响

图 1 是将新鲜圆柱状胡萝卜样品轴向、径向的 NMR 信号通过 Fourier 变换获得的二维质子密度加权图像。图 1b 是图 1a 对应样品的俯视图像。图 1a 中样品轴向图像 X 方向的起、止像素位置分别为 1、147 pixel, Y 方向的起、止像素位置分别为 87、131 pixel; 图 1b 中样品径向图像 X 方向的起、止像素位置分别为 29、139 pixel, Y 方向的起、止像素位置分别为 70、180 pixel。样品在进行轴向、径向成像时, 选择了不同的视场, 使得图 1 中图像在 X 方向的起止像素差值不同。

图 1a 中的信号廓线是图像中心像素 (Y 109 pixel) 处质子密度信号强度 (I) 沿 X 方向的分布图。因为核磁共振信号对水分的变化非常敏感, 所以该图同时反映物料轴向某处水分廓线的径向分布和变化规律; 图 1b 中的信号廓线是图像中心像素处 (Y 125 pixel) 信号强度 I 沿 X 方向的分布图。它可以表达物料径向某处水分廓线沿径向的分布和变化规律。



a. 轴向
a. Axial direction



注：图 a 中的信号廓线是图像中心像素 (Y 109 pixel) 处质子密度信号强度 (I) 沿 X 方向的分布图；图 b 中的信号廓线是图像中心像素处 (Y 125 pixel) 信号强度 I 沿 X 方向的分布图。
 Note: Signal profile in figure a was the proton density signal intensity (I) distribution in the X direction in the image center pixel (Y 109 pixel); Signal profile in figure b was the signal intensity (I) distribution in the X direction in the image center pixel (Y 125 pixel).

图 1 新鲜圆柱状胡萝卜核磁共振(NMR)图像
 Fig.1 Nuclear magnetic resonance (NMR) image of cylindrical carrot sample

理论上，对于水分分布均匀的圆柱形物料，物料轴向层面信号强度廓线应呈矩形，廓线无限接近 X 轴时数值差的变化能够反应干湿界面（干燥面）移动信息，廓线与 X 轴所围面积 (A) 的大小能够表达该层面含有水分的多少。图 1b 上显示，中心像素处沿 X 方向的信号强度 I 值并不唯一；而且图像灰度值也不同，这说明这一层面水分分布不均匀，其原因可能是样品轴向制备不规则或物料不同位置处物理结构存在差异造成水分分布不均匀引起的。

从 40℃ 圆柱状胡萝卜干燥过程中获得的径向图像里，提取物料图像中心处 (Y 向) 的径向层面信号强度 I 分布，获得了径向廓线在干燥过程中的变化特征和规律 (图 2)。可以看出，干燥过程中，物料中心处的径向信号廓线由 0 时的近似矩形，逐渐收缩至 8 h 时的近圆形，再至 15 h 时逐渐接近系统背景信号廓线。廓线不规则收缩说明干燥过程中圆柱形物料内部水分梯度一直发生变化，其水分传递是典型的非稳态、不可逆传递过程。廓线两侧没有出现近似于对称的收缩，这是因为每次径向成像时，物料在射频圈内沿 X 方向产生了相对位移。信号强度廓线与 X 轴所围面积逐渐缩小，说明该层面物料一直处于失水状态。研究发现，物料其他各层面失水规律具有相似性。从图 2 中还可以发现，物料径向中心层面信号强度廓线无限接近 X 轴时，数值差在不同干燥时间发生了变化。这说明，随着干

燥过程的进行该层面干湿界面沿径向向中心移动。因此，物料内部水分传递具有多向性，即具有空间多维传递特征^[18-19]。

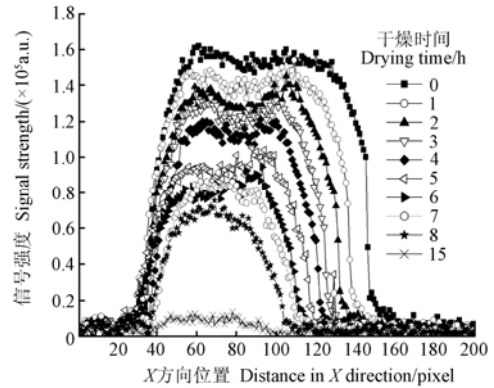


图 2 40℃干燥过程中胡萝卜中心径向层面信号强度分布变化
 Fig.2 Signal strength distributions and changes of carrot center layer in radial direction at 40℃

图 3 是胡萝卜样品在 70℃ 环境中干燥 2 h 时，从获得的轴向图像里提取物料轴向中心处 (113 pixel) 至边缘 (99 pixel) 间不同层面的信号强度 I 分布。靠近轴向中心像素位置，信号强度廓线密集、数值大，这说明靠近轴向中心位置物料干燥缓慢，水分含量高，未形成水分梯度；靠近边缘位置，信号强度廓线稀疏、数值小，说明物料边缘干燥迅速，水分含量较低，存在明显的水分梯度。物料表面水分梯度的快速建立说明其水分传递具有 non-Fickian 传递特征^[20]。物料不同轴向层面信号强度廓线无限接近 X 轴时，数值差的变化反映了物料内水分廓线沿轴向存在空间分布。这些特征也说明干燥过程中物料内部的水分梯度呈非线性关系。

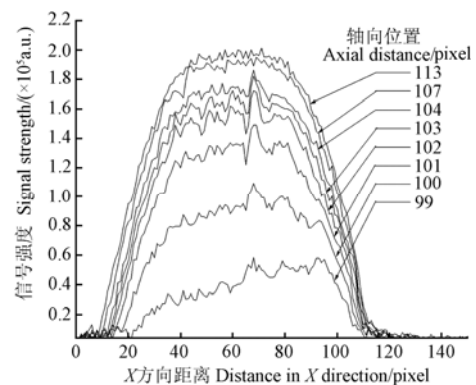


图 3 70℃干燥 2h 时胡萝卜样品轴向各层信号强度分布变化
 Fig.3 Signal strength distributions and changes of carrot center layer in axial direction at 70℃

对于热力干燥，物料常会有收缩现象^[21-22]。这一现象不仅影响产品外形，而且会给理论模拟水分传递增加困难^[23-24]。由图 4 可以发现，物料径向收缩速率

大于轴向收缩速率。温度升高后，二者收缩速率增加。如果将物料真实外形和水分廓线进行比较，二者的差异可以反应干燥面收缩信息。从图 5 可以看出，当物料干基含水率高于 7.33 kg/kg 时，根据 NMR 图像获得的水分廓线宽度（像素差值）计算的湿区直径尺寸变化率（ R ）与物料直径变化率（ D/D_0 ），二者近似重合，这一现象说明水分在物料表面向环境传递，表面就是干燥面。此阶段可能是物料短暂的恒速干燥阶段。随着干燥的进行，湿区直径加速减小，二者出现分离。这说明干湿界面已经退缩到物料内部，物料表面已经是“干区”。此阶段是物料降速干燥阶段。“干区”的存在会使物料表面硬化、结壳，进而使物料整体水分传递速率下降。

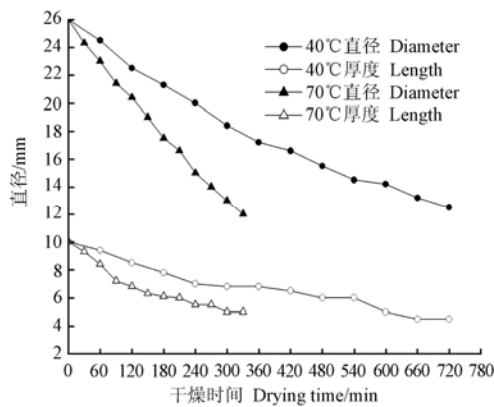


图 4 胡萝卜样品热风干燥过程中的收缩现象

Fig.4 Shrinkage phenomena of carrot sample during hot air drying

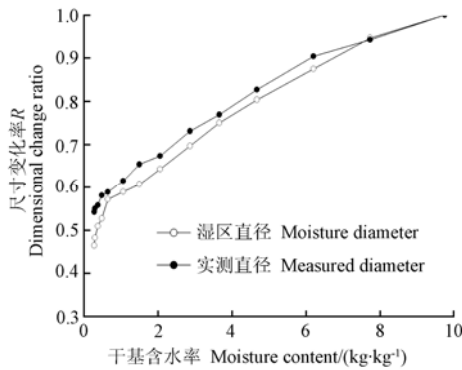


图 5 40°C 干燥过程中湿区直径与物料直径变化

Fig.5 Comparison of moisture profile and diameter at 40°C

热风干燥过程中，物料径向、轴向的不规则收缩现象以及干湿界面和物料表面的分离，这些干燥行为与传统 Fick 传递理论的“平衡状态传递”假设相违，这说明圆柱状胡萝卜内部水分的传递不能用传统 Fick 定律精确描述。

2.2 基于 NMR 图像信息的干燥过程模拟

根据核磁共振成像原理可知，质子密度信号强

度 I 与物料含水率 M 呈正相关性。由图 6 看出，胡萝卜样品干燥过程中的干基含水率与质子密度信号强度存在显著的线性相关关系 ($R^2=0.9951$)

$$I=8.2337+0.9062M,$$

直线斜率值是系统背景信号（后续计算进行了消除）。因此，利用二者的数学关联，可以根据已知的信号强度 I 获得未知的含水率 M 、已知信号强度廓线与 X 轴所围曲线的面积 A 获得物料内部水分分布，从而预测物料干燥过程。本文利用 Matlab 采用梯形数值积分法 (trapezoidal integration) 获得面积 A 。

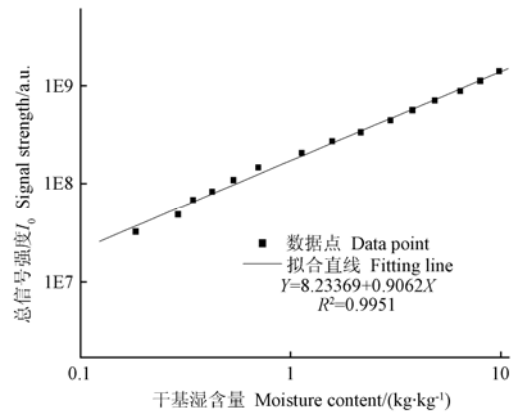


图 6 胡萝卜样品总质子密度信号强度与干基含水率关系 (双对数坐标系)

Fig.6 Relationship of moisture content and total signal strength (double logarithmic coordinates)

图 7 是基于质子密度信号强度 I 、积分面积 A 与含水率 M 间的关系，模拟了 70°C 干燥过程中物料平均水分变化以及 40°C 干燥过程中物料轴向向中心层面总水分变化曲线。纵坐标数值 MR 按公式(3)进行了处理。

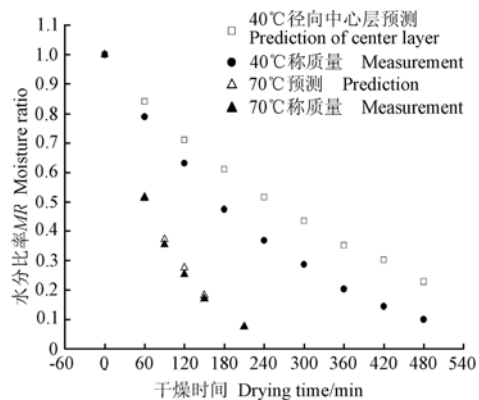


图 7 胡萝卜干燥过程模拟

Fig.7 Simulation of carrot drying process

$$MR = (M - M_e)/(M_0 - M_e) \quad (3)$$

式中， M_e 为平衡含水率，kg/kg。40°C 干燥时依据 GAB (guggenheim-anderson-de boer) 方程，根据文

献^[27]取值 0.1, 70℃干燥时取文献值 0.0019^[17]。

70℃干燥过程中, 利用质子密度信号强度估算的 MR 变化曲线用 Henderson-Pabis 模型^[26]描述, 如下

$$MR=1.003e^{-0.0114t}, R^2=0.9994$$

上式中, t 为干燥时间, min。物料平均水分变化数值与拟合值的相对误差 E 最大值 (7.69%) 出现在物料最后干燥阶段。这可能因为物料水分减少使 NMR 成像信噪比下降, 出现偏差。其他时刻 E 小于 4%。因此, 基于质子密度信号强度建立的 Henderson-Pabis 模型可以较好地模拟该干燥过程。

另外, 基于 NMR 图像信息获得的胡萝卜样品径向中心层水分在 40℃干燥过程中的变化规律用 Henderson-Pabis 模型, 如下

$$MR=1.005e^{-0.00286t}, R^2=0.9978$$

可以看出, 该中心层平均水分始终低于用称重法获得的物料平均水分, 这说明中心层面水分干燥速率最小。

3 结 论

1) 热风干燥过程中, 胡萝卜样品的水分廓线沿径向、轴向同时向中心不规则收缩, 其内部的水分传递是一个多维、非稳态传递过程。

2) 干燥一经发生, 水分梯度就在物料表面形成。干燥初始, 水分传递主要在物料表面。这个过程是短暂的恒速干燥过程。随着干燥的进行, 物料干基含水率低于 7.33 kg/kg 时, 物料湿区直径收缩比率大于物料实测直径收缩比率, 即物料出现“干湿界面”。此时, 表面成为“干区”, 干湿界面退缩到物料内部。水分的传递具有 non-Fickian 传递特征。

3) 圆柱状胡萝卜的热风干燥过程可以用 Henderson-Pabis 模型进行描述。利用质子密度信号强度与物料含水率的线性关系, 建立的平均水分传递模型 ($R^2=0.9994$) 可以很好地模拟 70℃干燥试验结果, 最大相对误差 E 值为 7.69%; 建立的中心层水分传递模型 ($R^2=0.9978$) 可以很好地预测 40℃干燥试验过程。

[参 考 文 献]

- [1] 史勇春, 等译. 干燥过程原理及新进展[M]. 济南: 济南出版社, 2002: 8.
- [2] Datta A K. Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food process. I: Problem formulations[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 80—95.
- [3] Martinus A J S, Van Boekel. Kinetic modeling of food quality: a critical review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 144—158.
- [4] Ali Mohammadi, Shahin Rafiee, Zahra Emam-Domeh, et al. Kinetic models for color changes in kiwifruit slices during hot air drying[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2008, 4(3): 376—383.
- [5] 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 733—738.
- [6] Huajing Xing, Pawan Singh Takhar, Greg Helms, et al. NMR-imaging of continuous and intermittent drying of pasta[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(1): 61—68.
- [7] Pamela F. Faure, Sabine Care, Julie Magat, et al. Drying effect on cement paste porosity at early age observed by NMR methods[J]. Construction and Building materials, 2012, 29(4): 496—503.
- [8] Sally G Harding, David Wessman, Stig Stenstrom, et al. Water transport during the drying of cardboard studied by NMR imaging and diffusion techniques[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(18): 5269—5281.
- [9] 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.
Zhang Xukun, Zhu Shusen, Huang Jianhua, et al. Analysis on internal moisture changes of carrot slices during drying process using low-field NMR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 282—287. (in Chinese with English abstract)
- [10] Koptuyug I V, Kabanikhin S I, Iskakov K T, et al. A quantitative NMR imaging study of mass transport in porous solids during drying[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 56(18): 1559—1571.
- [11] Frias J M, Foucat L, Bimbenet J J, et al. Modeling of moisture profiles in paddy rice during drying mapped with magnetic resonance imaging[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86(1/2): 173—178.
- [12] Prabal K Ghosh, Digvir S Jayas, Marco L H, et al. A magnetic resonance imaging study of wheat drying kinetics[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 189—199.
- [13] 张建峰, 吴迪, 龚向阳, 等. 基于核磁共振成像技术的作物根系无损检测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 181—185.
Zhang Jianfeng, Wu Di, Gong Xiangyang, et al. Non-destructive detection of plant roots based on magnetic resonance imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 181—185. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王娜. 核磁共振及其成像技术在脐橙的生长和储藏过程中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
Wang Na. An Application of NMR and MRI to the Processing of Growth and Storage of Navel Orange[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [15] Bhudsawan Hiranvarachat, Peamsuk Suvarnakuta, Sakamon Devahastin. Isomerisation kinetics and antioxidant activities of β -carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions[J]. Food Chemistry, 2008, 107(4): 1538—1546.
- [16] van der Heijden G H A, Huinink H P, Pel L, et al. Non-isothermal drying of fired-clay brick, an NMR study[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(12): 3010—3018.
- [17] Jaruk Srikiatden, John S Robers. Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(4): 516—525.
- [18] Sanga E C M, Mujumdar A S, Raghavan G S V. Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material[J]. Chemical Engineering and Processing, 2002, 41(6): 487—499.

- [19] Wu B, Yang W, Jia C. A three-dimensional numerical simulation of transient heat and mass transfer inside a single rice kernel during the drying process[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87(2):191–200.
- [20] Hills B P, Godward J, Wright K M. Fast radial NMR microimaging studies of pasta drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 1997, 33(3/4): 321–335.
- [21] Soraya Kerdpiboon, Sakamon Devahastin, William L. Kerr. Comparative fractal characterization of physical changes of different food products during drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(4): 570–580.
- [22] Hatamipour M S, Mowla D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(3): 247–252.
- [23] Mayor L, Sereno A M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials:a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(3):373–386.
- [24] Md Azharul Karim, Hawlader M N A. Drying characteristics of banana: Theoretical modeling and experimental validation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 70(1): 35–45.
- [25] Ireneusz Bialobrzewski. Simulation of changes in the density of an apple slab during drying[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2006, 33(7): 880–888.
- [26] Krabbenhoft K, Damkilde L. A model for non-Fickian moisture transfer in wood[J]. *Materials and Structures*, 2004, 37(9): 615–622.
- [27] Kiranoudis C T, Maroulis Z B, Tsami E, et al. Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables[J]. *Journal of Food Engineering*, 1993, 20(1): 55–74.
- [28] Magdalena Zielinska, Marek Markowski. Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2010, 49(2): 212–218.

Moisture transport in carrot during hot air drying using magnetic resonance imaging

Xu Jianguo¹, Xu Gang¹, Zhang Xukun², Gu Zhen¹, Zhang Senwang¹, Li Huadong^{1*}

(1. Food Engineering Innovation Center of Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029 China; 2. Key Laboratory of Non-destructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The drying process is one of the most important processes in food engineering. Heat and moisture transfer in fruits and vegetables during drying is a complex process, and knowledge of the moisture profile is fundamentally important for industrial processes, because the quality aspects of dried foodstuffs, such as nutrient content, safety and weight, are related to moisture content. A better understanding of the mechanism of moisture transfer should help improve product quality and the efficiency of the drying process. Such information will also help produce realistic computer simulations of drying processes and Fickian and non-Fickian models of moisture transport. Moisture profiles in foodstuffs can be measured using destructive and non-destructive methods. Slicing and freezing is not an accurate method because of low precision and moisture loss during cutting process, although it could give inside moisture distribution. In recent years, the applicability of nuclear magnetic resonance imaging (MRI) to measure mass transport phenomena in porous systems, especially in foodstuffs and biological materials, including drying processes, has been demonstrated. NMR imaging as a non-destructive, non-invasive, promising technique has been used to obtain moisture profiles during drying of vegetables and fruits. In this paper, the moisture transport in a cylindrical carrot sample was visualized and studied using nuclear magnetic resonance images obtained from the drying experiments. The transient moisture profile distributions in carrot were measured during the hot-air drying process with air temperatures of 40 and 70°C, respectively. Experimental results showed that the moisture profiles moved irregularly toward the center of the carrot sample in both the axial and radial directions, indicating a multi-dimensional and unsteady-state mass transfer process that has non-Fickian moisture transport characteristics. In the initial drying stage, a sharp moisture gradient was found indicating significant moisture flux at the surface of the carrot. With the process of drying, the ratio of the MRI diameter declined faster than that of the optical diameter, which indicated that the dried layer appeared at the surface and moisture profile moved inside. The Henderson-Pabis model ($MR=1.003e^{-0.01114t}$, $R^2=0.9994$) achieved better predictive accuracy than other models and satisfactorily described drying characteristics of the carrot cylinder at 70°C. The maximum relative error of prediction compared with the measured results was 7.69%, with relative errors during the drying process at 70°C commonly remaining less than 4%. The moisture transport of the carrot center layer was simulated by the Henderson-Pabis model ($MR=1.005e^{-0.00286t}$, $R^2=0.9978$) during the drying process at 40°C. These results could assist in the optimization of drying process and theoretical simulation on moisture transport considering shrinkage caused by drying.

Key words: magnetic resonance imaging, moisture, drying, moisture profile, moisture transport, shrinkage