

# 红外辐射对胡萝卜切片脱水作用机制研究

刘玉辉 王相友 魏忠彩

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

**摘要:** 为揭示不同形态的水在胡萝卜干燥过程中的迁移机制, 探明不同形态水在干燥过程中的相互作用和相互转化关系, 利用低场核磁共振技术对自由水、不易流动水和结合水3种形态水的分布和迁移规律进行分析。研究表明, 在干燥前期主要脱除的是自由水, 在干燥后期主要脱除的是结合水; 在干燥前期, 有少量的自由水向结合水转变, 说明在此期间有细胞生命活动参与; 在干燥后期, 结合水向自由水转变。对红外和热风两种干燥方式下的扫描电镜图像进行分析, 发现经红外干燥的物料比面小、空隙尺寸大、空隙迂曲度低、结构松散、通透性好、渗流能力强, 有利于水的迁移, 说明在红外干燥过程中, 物料中的空隙在不同方向上所受的应力均衡。透射电子显微镜图像显示, 经红外干燥的物料, 其细胞空间架构规则有序, 细胞膜、液泡膜及各种细胞器膜均消失, 细胞器所占区域变小。这是因为有机质中内嵌的结合水在获取红外辐射能量后从复合结构中分离出来, 失去连接纽带的生物大分子裂解为小分子。由于红外辐射将胡萝卜中大的水分子团簇分解为小的水分子团簇, 水的粘度降低、流动性增强、渗透能力增强、迁移能力增强, 因此, 红外干燥具有更高的干燥效率。

**关键词:** 胡萝卜; 水形态; 迁移; 超微结构; 红外辐射干燥; 热风干燥

**中图分类号:** TS255.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2021)01-0350-10

**OSID:**



## Mechanism of Infrared Radiation on Dehydration of Carrot Slices

LIU Yuhui WANG Xiangyou WEI Zhongcai

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** The low field NMR (LF-NMR) was used to analyze the distribution and migration of free water, semilow water, and bound water to reveal the migration mechanism of different forms of water, the interaction between different forms of water and their mutual transformation relationship during the drying process of carrot. It was found that the free water in carrot was mainly removed in the early stage, and the combined water was mainly removed in the later stage in the process of drying. It was showed that there were life characteristics of cells involved in the early stage of carrot drying because a small amount of free water was converted into bound water. As it was expected, the bound water was changed to free water in the later stage of drying. When the scanning electron microscope (SEM) images were analyze, it was found that the infrared dried materials had smaller specific surface area, larger void size, lower void tortuosity, umbrella delivery structure, greater permeability, and stronger seepage capacity than those dried by hot air. Through the analysis of transmission electron microscopy (TEM) images, it was found that the spatial structure of the cells of the materials dried by infrared was more regular and orderly than that of the materials dried by hot air, and the cell membrane, vacuole membrane and membrane structures on other organelles were all disappeared, and the area occupied by organelles became smaller than it was at the beginning. Since the "embedded" bound water in organic matter was separated from the complex structure of biomacromolecules after obtaining infrared radiation energy, these biomacromolecules were broken into many small molecules after losing the bonds. The mechanism of dehydration of carrot slices, the migration law of various forms of water in carrot, and the law of mutual transformation between various kinds of water under the action of infrared radiation were deeply analyzed. The research result not only provided theoretical basis and ideas for the design and optimization of drying process, but also provided technical support for the development and improvement of infrared drying equipment.

**Key words:** carrot; water forms; migration; ultrastructure; infrared radiation drying; hot air drying

收稿日期: 2020-09-22 修回日期: 2020-10-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31271908)

作者简介: 刘玉辉(1973—), 男, 博士生, 主要从事农产品加工技术研究, E-mail: liuyuhui@sdu.edu.cn

通信作者: 王相友(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工技术与装备研究, E-mail: wxy@sdu.edu.cn

## 0 引言

目前,对红外辐射干燥技术在果蔬中的应用研究主要集中于干燥效果方面。文献[1]对振动床辅助红外干燥和真空辅助红外干燥的效果进行了研究。文献[2]对热风 and 红外两种方式在桃渣干燥中的效果进行了比较。关于红外辐射对水的作用机理,文献[3-4]研究发现,红外辐射能够快速脱除大部分的自由水和不易流动水;文献[5]发现,与物料缔合作用较弱的结合水较容易脱除,而少量缔合作用较强的结合水则因性质稳定而不易被脱除,但并未对红外辐射对水的作用机制进行微观层次的研究。

胡萝卜含水率高、含水种类复杂,是研究红外辐射干燥对水作用机理的理想材料。胡萝卜所含水分主要以结合水、不易流动水和自由水 3 种形态存在<sup>[6]</sup>。自由水是没有被非水物质化学结合的水,可分为滞化水、毛细管水和自由流动水。结合水则是吸附或结合在有机固体物质上,依靠氢键与蛋白质的极性基(羧基和氨基)相结合形成的水胶体。不易流动水介于两种状态之间,呈过渡状态,具有两种形态:一种是受细胞内各种膜结构的隔离,被限定在某局域范围内的自由水;另一种是处于自由水和结合水之间呈调和状态的水<sup>[5]</sup>。

在胡萝卜干燥过程中,随着物料温度的升高和水分的散失,水蒸气在物料空隙中的占比增加,水蒸气在空隙中形成的蒸汽压逐渐增大。空隙中的水蒸气不但是液态水迁移的外部因素,也是物料中水分存在的第 4 种形态。

上述 4 种形态的水与物料发生分离的微观机理不同,在干燥过程中,4 种形态的水之间不断进行着相互转化,无法用单一的数学模型进行描述,也不能用单一的方法进行分析。在水分迁移的过程中,物料的结构也在不断发生变化,既影响到物料中水分的迁移速率,也影响到干燥过程中能量的传递特征和传递效率。本文通过胡萝卜干燥过程中红外辐射对不同形态水作用机制的研究,分析这些机制与对应的宏观效果之间的关系,以期对红外干燥过程中能量的合理利用提供思路,为设计果蔬红外干燥设备、完善红外干燥工艺、提高果蔬干燥品质提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

胡萝卜,购自淄博农贸市场,新鲜清洁、无损伤、品质优良。

### 1.2 仪器与设备

PQ001 型核磁共振分析仪,纽迈电子科技有限

公司;YHG. 500 - BS 型远红外恒温干燥箱,上海跃进医疗器械厂;DHG - 0246A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验仪器设备有限公司;TP - 114 型电子天平,丹佛仪器(北京)有限公司;物料盘若干;样品厚度可调节刀具;镊子;手套;与实验样品直径一致的模具;Quanta250 型扫描电子显微镜,FEI 香港有限公司;JEOL - 1200EX 型透射电子显微镜,日本 JEOL 公司;LKB - V 型切片机,瑞典 LKB 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 湿基含水率测量

实验前将胡萝卜洗净、晾干,沿胡萝卜横向切成直径为 40 mm 和要求厚度的圆饼状薄片,并按要求的料层厚度摆放于料盘中。分别采用红外辐射加热系统和热风干燥系统两种方式对物料进行干燥。待干燥箱内温度分别达到 50℃ 和 60℃ 两种预设温度时,将样本摆放于干燥箱内平台上;每隔 30 min 取样一次并称量,进行 LF - NMR(低场核磁共振)检测,再将所取样品置于 105℃ 热风恒温箱内干燥至绝干状态;当样本湿基含水率降至安全贮藏湿基含水率(8.7%)时实验结束。

胡萝卜测定的初始含水率为 93.2%,干燥过程中的湿基含水率根据 GB/T 5009.3—2010《食品中水分的测定方法》进行测定<sup>[7]</sup>。

#### 1.3.2 LF - NMR 检测

在胡萝卜样品切片厚度 1 mm、物料层厚度 10 mm、干燥温度 80℃、辐照距离 120 mm、功率密度 400 W/g 条件下进行红外干燥,每隔 30 min 取样一次,将干样品置于试管中。

共振频率为 18.182 MHz,磁体强度为 0.43 T,线圈直径为 25 mm,磁体温度为 32℃。使用核磁共振分析测量软件及 CPMG(Carr - Purcell - Meiboom - Gill)序列采集样品信号。

打开核磁共振软件,当温度稳定在  $(32.0 \pm 0.1)$ ℃ 范围内时,利用分析软件 FID(Free Induction Decay)脉冲序列矫正系统参数。将装有样品的试管置于磁体线圈中,利用 CPMG 脉冲序列采集样品横向弛豫时间  $T_2$ ,再利用反演软件 SIRT 1000000 进行反演运算,得到  $T_2$  反演图谱。

#### 1.3.3 超微结构观察与测定

选取在 50℃ 下,经红外干燥和热风干燥后的胡萝卜样品,在中心髓部的同一位置取样,切成 2 mm × 2 mm 的小块,用镊子固定到样品台上,喷金镀膜处理 5 min,真空度为 200 Pa,加速电压为 5 kV,采用电子显微镜观察表面结构。

选取新鲜胡萝卜样品、经 50℃ 热风干燥和 50℃ 红外干燥后的样品,分别在 3 种样品髓部的同一位

置,用双面刀片分别取样,切成 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的长方体块,用4%戊二醛溶液( $0.1\text{ mol/L}$ 磷酸缓冲液配制,pH值为7.2)在 $4^\circ\text{C}$ 条件下固定2 h,用pH值为7.2的磷酸缓冲液漂洗3次,每次15 min。用1%锇酸溶液(磷酸缓冲液配制) $4^\circ\text{C}$ 固定2 h,用磷酸缓冲液冲洗漂洗3次,每次30 min。用50%、70%、80%、90%、100%丙酮溶液梯度脱水,各级30 min。环氧树脂Epon-812渗透包埋, $37^\circ\text{C}$ 干燥箱聚合12 h后,于 $45^\circ\text{C}$ 聚合12 h,最后于 $60^\circ\text{C}$ 聚合24 h。用LKB-V型超薄切片机切成60 nm的薄片,再经铅铀电子染色后,于JEOL-1200EX型透射电镜观察拍照。

## 2 胡萝卜切片中水的特征

### 2.1 自由水的特征

#### 2.1.1 水分子团簇

胡萝卜中的水是以水分子团簇的形式存在的,图1为不同状态下的水分子团簇。在氢键的作用下,纯水中水分子团簇一般由5~8个水分子组成,溶液中的水分子以所溶解的粒子为核心,形成由十几个水分子组成的水分子团簇,蛋白质等生物大分子的周围,往往会聚集几十个甚至上百个水分子,在水溶胶体中,水分子团簇所含水分子的数量更加庞大。大的水分子团簇会形成一定的层级结构,呈多层分布状态<sup>[8]</sup>。

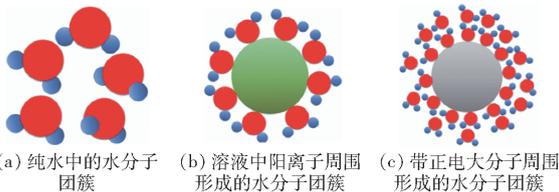


图1 几种不同水分子团簇示意图

Fig. 1 Schematics of several different water clusters

胡萝卜不但含水率高,而且形成的水溶物成分复杂,因此,胡萝卜中水分子团簇也复杂多样。当胡萝卜中的水分子团簇与有机质分子中的化学键相互作用时,会形成数量庞大的弱氢键,其势能面可以持续几个分子层,形成水化层结构<sup>[8-9]</sup>。水化层结构中溶解的颗粒在表面不饱和键力或极性作用的影响下,吸引偶极水分子,使极性水分子在颗粒表面形成定向、密集、有序排列的水分子层。物质的浓度越高,或者同种物质的固态颗粒物表面积越大,吸引的水分子数量就越多,形成的水化层级越多,水分子团簇越大,水的粘度越高。

#### 2.1.2 自由水的传质特征

胡萝卜中的自由水主要是位于胡萝卜的细胞膜之外的组织水,这部分水可以在细胞壁以及纤维素

架构的空间网状体系之中自由流动。自由水在胡萝卜中的传递阻力包括:毛细力、固体颗粒对水的达西阻力、气体与液膜之间的相互作用、液膜运动的惯性力及水自身的重力。

作为植物的根部,胡萝卜承担了对水分的吸收和传输的功能,因此,在沿着胡萝卜的轴向上,形成了大量利于水分传输的微管道,水在这些微管道中的迁移具有多孔介质传质的基本特征。自由水的迁移受比面、空隙尺寸、迂曲度、渗透率、切应力的影响。

比面表征物料单位体积所含空隙尺寸的大小,物料的比面越大,物料的吸湿能力、水分迁移能力和传热能力越强<sup>[10]</sup>。比面计算公式为

$$\Omega = \frac{A_s}{V} \quad (1)$$

式中  $\Omega$ ——比面, $\text{cm}^{-1}$

$A_s$ ——固体骨架总表面积, $\text{cm}^2$

$V$ ——多孔介质总容积, $\text{cm}^3$

物料的空隙尺寸越大,水的迁移能力就越高<sup>[10]</sup>。空隙尺寸计算公式为

$$d = \frac{4\sigma\cos\theta}{p_c} \quad (2)$$

式中  $d$ ——空隙尺寸, $\text{cm}$

$\sigma$ ——表面张力, $\text{N}$

$\theta$ ——接触角, $\text{rad}$

$p_c$ ——非湿润流体进入空隙所需压强, $\text{Pa}$

在物料失水收缩的过程中,空隙连通通道的弯曲程度增大,即物料的迂曲度 $\zeta$ 上升。物料的迂曲度越高,物料中的水分迁移速率就越低<sup>[10]</sup>。迂曲度计算公式为

$$\zeta = \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \quad (3)$$

式中  $L_e$ ——弯曲通道真实长度, $\text{cm}$

$L$ ——连接弯曲通道两端的直线长度, $\text{cm}$

根据达西渗流定律,物料的空隙率越高,孔道面积越大,水的渗透性就越好,水的迁移能力越强<sup>[10]</sup>。水在空隙中流速的计算公式为

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4)$$

式中  $u$ ——水在空隙中的流速, $\text{cm/s}$

$\frac{\partial p}{\partial x}$ ——流动方向的压力梯度, $\text{kPa/m}$

$K$ ——渗透率, $\text{mD}$

$\mu$ ——流体粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

物料中水分的迁移还受流体切应力 $\tau$ 的作用<sup>[10]</sup>,即

$$\tau = \frac{f}{A} = \eta A \frac{du}{dz} \quad (5)$$

式中  $f$ ——摩擦阻力, N

$A$ ——接触面积,  $\text{cm}^2$

$z$ ——水与管壁距离, cm

$\eta$ ——水粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

水的粘度越高、流速越快, 水在迁移过程中的切应力就越大。

## 2.2 结合水的特征

由于胡萝卜具有复杂的生物体特征, 所含有机生物成分复杂多样, 胡萝卜所含结合水的状况要远比自由水复杂得多。胡萝卜中的结合水是水参与生命活动最基本的存在状态, 它是受限于蛋白质、酶、DNA、RNA 或细胞膜等生物分子紧邻的溶剂化层内的水分子<sup>[11-13]</sup> (见图 2, 图中  $v$  为水分迁移的平均流速)。A 对应着与表面结合的水分子, B 为水合层内的准自由水分子, C 则为体相水中的自由水分子, D 为与有机生物分子复合的结合水分子<sup>[4]</sup>。

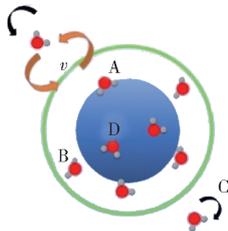


图 2 几种不同水合模式相关水分子示意图

Fig. 2 Schematic depicting existence of different types of water molecules associated with different hydration modes

胡萝卜中的结合水主要有两种存在形态: 一种是物料中具有亲水特性的物质与自由水或不易流动水发生浸润作用而形成的; 另一种结合水则是构成细胞壁、细胞膜、细胞器等胞内物质的主要成分, 这部分水分子通常冻结在蛋白质等生物分子内, 成为稳定这些生物分子二级结构的重要元素, 这部分结合水不易脱离<sup>[14]</sup>。

生物分子中所含的极性基团倾向于直接与水分子作用, 而非极性基团则会增强水分子之间的相互作用<sup>[15]</sup>, 使得结合水与自由水具有明显不同的动力学特征<sup>[16]</sup>。与自由水相比, 结合水在结构上更加有序<sup>[17]</sup>, 生物分子表面水分子的局域密度增加了 25%<sup>[18]</sup>, 由于生物分子与水分子之间的氢键结构取代了自由水中的水-水氢键结构, 使得水合层内水分子的转动和平动均表现出较强的时间依赖性, 水合层水分子之间氢键断裂的平均速率比自由水中的断裂速率要慢很多<sup>[19]</sup>, 约为球蛋白或含亲水基团的胶束表面上的水分子动力学速率的 1/4, 比比较大亲水尾部的胶束周围的水分子甚至变慢 1 个较大的数

量级<sup>[20]</sup>, 生物体细胞中 85% 的水分子的动力学行为与体相水类似, 而剩余 15% 的水分子的动力学速率平均变慢为自由水的 1/15<sup>[21]</sup>。

将胡萝卜所含结合水从物料中分离出来的过程, 不但是一个水分迁移的物理过程, 更是一个复杂的化学变化过程。位于生物分子表面结合水的性质非常复杂, 既强烈地依赖于生物分子本身的结构和性质, 又与生物分子彼此相互依存。由图 3 可知, 表面水分子能够依据羧基基团的自组装疏密程度, 在一定的自组装密度范围内嵌入仿生膜的羧基基团表面, 与表面羧基基团形成完整稳定的内嵌水-羧基复合结构<sup>[22]</sup>。

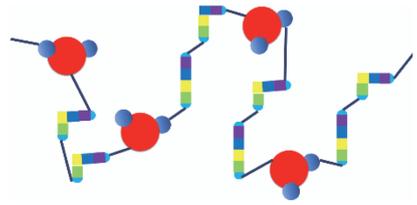


图 3 水分子嵌入羧基基团表面所形成的完整稳定的复合结构

Fig. 3 Water molecules embedded in surface of carboxyl group formed complete and stable composite structure

由于胡萝卜中的结合水与自由水表现出完全不同的物理性质和化学性质, 因此, 结合水在干燥过程中的脱水机理和自由水具有显著差异。结合水与物料发生分离的过程, 也是物料中有机物分子发生化学性质改变的过程, 在这个过程中, 胡萝卜的生命力逐渐降低, 生命特征逐渐消失, 物料的塑性逐渐降低, 硬度增加, 干物料自身的解构和自我破坏能力减弱, 物理性质和化学性质均趋于稳定, 同等状况下, 物料的贮存期增长。在干燥到这个阶段时, 物料就达到进行长期贮存的目的。

## 2.3 不易流动水的特征

胡萝卜所含不易流动水主要位于细胞膜和细胞器膜内部, 其中液泡膜内的含水率最高, 这部分水可以在膜结构形成的空间内部自由流动, 但在透过膜结构时会受到一定的阻碍作用。生物膜结构相对致密, 允许较小的水分子团通过, 在孔隙尺寸与水分子团的直径相近时, 水分子团之间的碰撞和水分子团与孔壁之间的碰撞都起作用, 这样, 水分子团的迁移速率与分子扩散和克努森扩散均有关系, 有效扩散系数<sup>[10]</sup>可以表示为

$$D_E = \left( \frac{1}{D_{AB}} + \frac{1}{D_K} \right)^{-1} \quad (6)$$

其中

$$D_K = \frac{2}{3} \bar{r} \bar{v} \quad (7)$$

式中  $D_E$ ——有效扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$

$D_{AB}$ ——水分子扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$

$D_K$ ——克努森扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$

$\bar{r}$ ——膜上的空隙平均半径,  $\text{cm}$

$\bar{v}$ ——水分子运动的均方根速率,  $\text{cm}/\text{s}$

由于这种状况下水分子团簇的运动速率较低,水分子团簇之间相互碰撞产生的阻碍作用,远小于孔壁对水分子团簇摩擦产生的阻碍作用,因此,水分子团簇通过膜结构上的空隙产生的阻碍作用,主要受克努森扩散系数<sup>[10]</sup>的影响。

胡萝卜中不易流动水的迁移速率,既与水分子团簇的大小有关,也与干燥过程中细胞内各种膜结构的完整性密不可分。

## 2.4 水蒸气的特征

胡萝卜中水蒸气的传质包括水蒸气随空气等不凝性气体在物料中的整体连续流动和水蒸气在空隙空间中相对于空气进行的扩散两种迁移形式。水蒸气的扩散主要由密度变化引起。根据 Philip 和 Vries 理论<sup>[10]</sup>,水蒸气的流速正比于空隙内水蒸气的密度梯度 $\nabla\rho_v$ ,公式为

$$v_{v,d} = -D_v \zeta v \frac{1}{\rho_v} \nabla \rho_v \quad (8)$$

其中

$$v = \frac{p}{p - p_v}$$

式中  $v$ ——质量流因子

$\rho_v$ ——水蒸气密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$

$p$ ——总的气体压,  $\text{Pa}$

$p_v$ ——蒸汽压,  $\text{Pa}$

$D_v$ ——蒸汽扩散系数,  $\text{cm}^2/\text{s}$

## 3 结果与分析

### 3.1 LF-NMR 检测结果分析

LF-NMR 技术具有无损、快速和精确等特点<sup>[23-25]</sup>,是检测物料内部水分分布和分析水分迁移规律的有效工具,文献[26]利用核磁共振技术对红外与热风干燥条件下的胡萝卜切片内部水分迁移特性进行了对比研究,文献[27]通过核磁共振技术对胡萝卜切片内部水分的变化进行了分析,文献[28]借助低场核磁共振技术研究了稻谷颗粒中的水分迁移过程。利用低场核磁共振技术分析物料中不同形态水的分布特征和变化规律,对于研究胡萝卜干燥过程中的红外辐射对水作用的机理,能够发挥较好的作用。

图4为胡萝卜薄片干燥不同时间的 $T_2$ 弛豫图谱,物料在干燥初始状态有3个水峰,其中,0.1~10 ms为结合水峰,10~100 ms为不易流动水峰,>100 ms为自由水峰,其中自由水含水率最高,结合水含水率

最低。

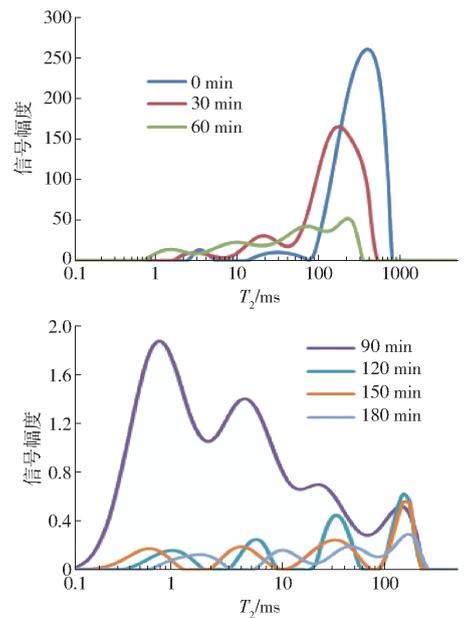


图4 胡萝卜薄片干燥不同时间的 $T_2$ 弛豫图谱

Fig.4  $T_2$  relaxation spectra of carrot slices during different drying times

在干燥初期,自由水的峰值下降明显,不易流动水和结合水的峰值变化幅度较小,物料中迁移的主要是自由水,并且自由水的峰值位置向左发生微小偏移。在干燥后期,物料中迁移的主要是结合水,结合水的峰值逐渐向右偏移。在干燥末期,物料中3种水的峰值接近相等。

图5中, $B_{21} + B_{22}$ 表征结合水的含水率, $B_{23}$ 表征不易流动水的含水率, $B_{24}$ 表征自由水的含水率, $B$ 表征总含水率。弛豫时间变化曲线显示:结合水含水率在干燥初期呈上升状态,60 min达到结合水含水率的峰值,之后快速下降,在120 min后逐渐趋于稳定;不易流动水的含水率在30 min之前呈现上升状态,在30~60 min期间,出现缓慢下降,在60~90 min期间,含水率快速下降;自由水的含水率一直下降,并且与物料中总含水率的变化趋势吻合。

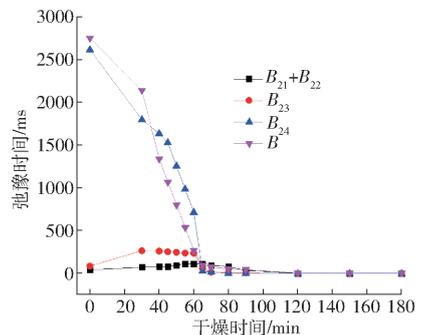


图5 不同形态水弛豫时间的变化曲线

Fig.5 Change of relaxation time of different forms of water

通过分析可以得出:物料干燥过程中的水分迁移主要是自由水的传质过程;在干燥前期,与物料分

离的是自由水,在干燥中期,主要是不易流动和结合水的迁移,在干燥末期,主要是结合水的迁移;在干燥过程中存在 3 种形态水之间的转换,前期为少量的自由水向不易流动水和结合水转变,后期则为结合水和不易流动水向自由水转变。

由于自由水含量高且脱除速率快,在脱水过程中需要吸收大量的辐射能而物料温度基本不变,因此,自由水脱除阶段宜采用较高辐射功率和较宽辐射波段以提高自由水脱除速率。结合水含量少且脱除速率慢,宜采用较低辐射功率避免营养物质因温度过高而变性,同时采用穿透力较强的短波辐射以提高内部结合水与物料的分速度。

### 3.2 SEM 微观结构分析

图 6 是对 60℃ 条件下经过红外和热风两种方式干燥后干样品在同一部位取样,在扫描电镜 (SEM) 下观察到的微观结构图。

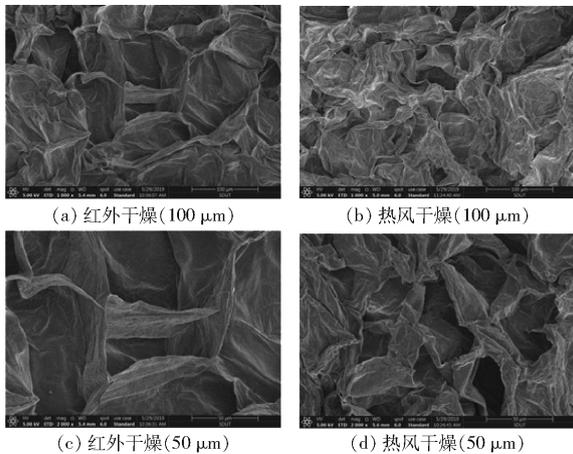


图 6 红外和热风干燥的样品微观结构 SEM 图像

Fig. 6 SEM image of microstructure of infrared drying and hot air drying sample

对照 100 μm 的 SEM 图像上两种方式干燥后样品的结构,可以看出物料结构差异显著。经红外干燥后样品的孔隙结构相对松散,相等空间范围中含有的空隙单元数量少,空隙单元占有的空间区域较大,空隙内部空间大,开阔度高。不同空隙尺寸接近,形状差异较小,空隙排列整齐、规则、有序、均匀,空隙通透性强,闭合空隙数量较少,空隙壁较薄;热风干燥后样品的结构致密,处于闭合或半闭合状态的空隙数量较多,空隙阻塞度较高,空隙单元排布的规则性不强,具有较高的无序性,空隙扭曲程度较大,空隙壁较厚。

对照 50 μm 红外干燥和热风干燥样品的 SEM 图像,可以发现物料在孔隙结构上差别较大。经红外干燥后物料的空隙架构规则有序,更好地保留了自然生长状态下细胞的结构状态,空隙空间较大,孔隙壁的收缩率较低,物料不仅具有较高的空隙率和

较大的通道面积,而且空隙形状大致呈方管状或圆管状直通状态,这种空隙排列方式,一方面充分扩大了物料所能支撑的空间区域,另一方面使得所有的空隙呈协同架构状态,孔隙壁互为依托,形成了整个物料中的空隙结构在全局上的蜂窝状。这种结构体系中的空隙具有较低的迂曲度、较大的空隙尺寸和较大的比面,对水流具有更小的切应力,水在空隙中迁移具有更高的渗透率,迁移过程产生的切应力较小。经热风干燥后的物料空隙发生了扭曲变形,迂曲度增加,相邻空隙之间相互挤压,致使部分空隙阻塞,通透性较低。由式 (1) ~ (5) 可知,经红外干燥后的物料具有较高的水分迁移能力。

在胡萝卜薄片干燥初期,物料空隙中空气含量较高,水蒸气与空隙中的空气一起作整体连续流动,并伴随一定的分子扩散。随着干燥的进行,空隙中的气体逐渐成为单一的水蒸气,水蒸气的传质变成单一的扩散模式,并且随着物料空隙的收缩,水蒸气的扩散逐渐从分子扩散向克努森扩散转变。水蒸气的迁移主要受气孔的孔道半径和孔道的迂曲度制约,通过 SEM 图像的对照分析,由式 (8) 可知,经红外干燥的物料更利于水蒸气的迁移。

### 3.3 TEM 超微结构分析

细胞结构的 TEM (透射电子显微镜) 图像如图 7 所示。从放大倍率为 1 500 的 TEM 图像可以看出:新鲜胡萝卜细胞结构完整、外形饱满圆润,排布规则有序;经红外干燥后的样品,细胞发生收缩,但细胞排列仍然规则有序,保留了鲜细胞在排列位置和空间分布上的原有状态;经热风干燥后的样品,细胞排列出现较大的紊乱性,细胞原有的空间特征和排列体系被打破。

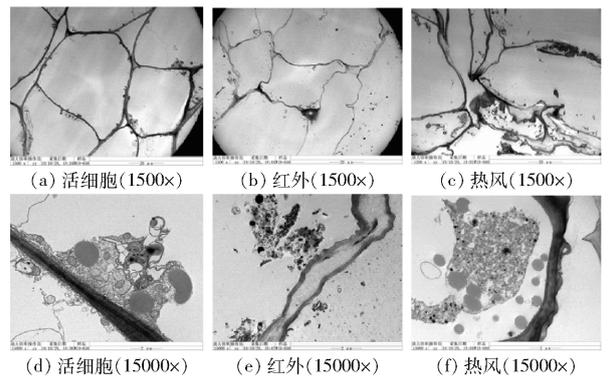


图 7 细胞结构的 TEM 图像

Fig. 7 TEM images of cell structure

对照放大倍率为 15 000 的 TEM 图像,可以看出:新鲜胡萝卜细胞膜和液泡膜结构完整,细胞器完整排列于细胞膜和液泡膜限定的区域内,各细胞器结构饱满、清晰可见,相邻的细胞壁之间紧密排列,呈平整光滑圆润的有机结合状态;经红外干燥后样

品的细胞内各种膜结构均消失,各细胞器均出现明显收缩,无法识别,相邻细胞壁中间出现宽度均匀的裂缝,细胞壁的通透性显著增强;经热风干燥后样品的细胞内,部分膜结构仍能清晰可见,膜结构出现破裂,各细胞器仍位于膜结构限定的位置,细胞器收缩度较小,细胞器类型可大致识别,相邻细胞的细胞壁紧密贴合在一起,细胞壁厚度增大,致密度提高,通透力降低。

由细胞结构的差异可以得出,在两种干燥方式下,细胞发生了差异显著的物理变化和化学变化。红外干燥过程中,样品的不同细胞以及细胞的不同部位之间所受应力差异较小,细胞在干燥过程中因受力均匀而呈现出规则收缩的状态,细胞内部的各种膜结构、细胞器以及其它有机质在红外辐照作用下,发生了明显的化学变化,各种有机成分均出现了不同程度的降解。

### 3.4 两种干燥方式湿基含水率变化曲线比较

分别在 50℃ 和 60℃ 两种温度场条件下,通过红外辐射干燥和热风干燥两种方式对胡萝卜薄片进行干燥,物料湿基含水率的变化曲线如图 8 所示。

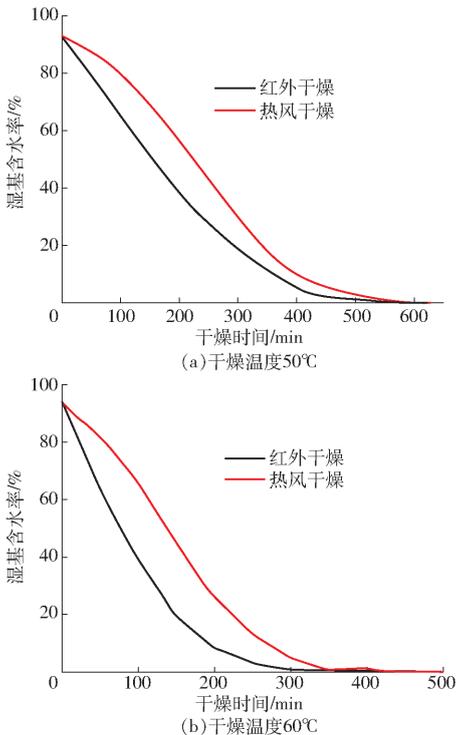


图 8 样品湿基含水率随干燥时间变化曲线

Fig. 8 Curves of moisture content on wet basis of sample with drying time

在相同的干燥温度和干燥时间条件下,经红外干燥的样品的湿基含水率一直低于热风干燥,说明在红外辐照条件下,物料中水的传质能力更强。红外干燥从起始阶段开始,物料中的水就具有较高的传质速率,湿基含水率降到 15% 之前,湿基含水率

与干燥时间呈线性关系。在热风干燥的初期,样品湿基含水率下降幅度较小,在湿基含水率下降到约 80% 后,湿基含水率与时间才呈现出线性关系。

根据牛顿第二定律<sup>[29]</sup>

$$ma = F + F_c + f \quad (9)$$

式中  $m$ ——流动水的质量, g

$a$ ——流体的加速度,  $\text{cm}/\text{s}^2$

$F_c$ ——毛细管压力对水的合力, N

$F$ ——毛细管力和摩擦力之外的压力, N

由图 9 可以看出,在干燥的初始阶段,两种干燥方式中  $F_c$  和  $f$  两个力是无差异的,因此,对物料中水分迁移形成差异的主要因素为  $F$ ,这主要是由红外和热风两种干燥方式对物料作用机理的差异造成的。热风干燥过程中,能量主要是通过热传导的方式由外而内进行传递,在物料温度达到内外均衡之前,热风干燥中的能量仍有一部分用于对物料进行加热升温。红外光线具有穿透性,红外辐射方式可以对物料的内部和表面同时加热,水分子对红外线具有广谱吸收特征,大部分红外辐射能量可以被水直接吸收,而不需要通过其它媒介进行传递,因此,即使在红外干燥初期物料温度较低的阶段,物料中的水在吸收红外辐射能量后仍能够与物料发生分离。

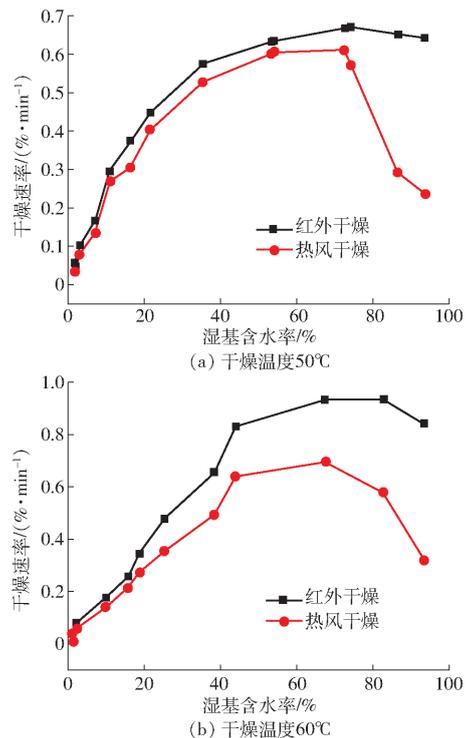


图 9 湿基干燥速率曲线

Fig. 9 Drying rate curves on wet basis

在湿基含水率下降到 80% 之后,两种干燥方式下水分迁移都呈现线性关系,此时热风对物料的加热过程基本结束,物料内外温度均衡,热风的能量主要作用于水分的迁移。但红外干燥条件下物料湿基

含水率的变化幅度仍然高于热风,可见,在红外干燥条件下, $F_c$  和  $f$  都小于热风。

通过 SEM 和 TEM 图像对物料的微观结构分析发现,经两种方式干燥的物料,无论是孔径还是形状,都差异显著,经红外干燥的物料空隙半径较大,孔道畅通,空隙迂曲度小,水在空隙中的渗透距离较小,水在空隙中的迁移阻力较小。

文献[30]研究发现,红外线可以通过破坏水分子氢键的方式,减少水分间的缔合力,使大的水分子团簇分解为小的水分子团簇。水分子团簇越小,水分子所含有的氢键势能越高,水分子团簇所具有的动能就越大,以小水分子团簇组成的水溶解力、渗透力、代谢力、扩散力等物化性质都会增强<sup>[31]</sup>,水对生物膜的透过能力也随之提高<sup>[32]</sup>。

水分子间氢键的振动频率在远红外区( $10 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ ),水在远红外辐射的作用下,水缔合形成的大分子团簇发生裂解,由原来的数十个到上千个水分子组成的大水分子团簇分解为由  $5 \sim 8$  个水分子组成的小团簇,水的粘度下降,溶解力、渗透力、代谢力、扩散力、乳化力均提高<sup>[30]</sup>。

根据沃什伯恩方程<sup>[29]</sup>

$$v = \frac{r^2 (\Delta p - p_c)}{8\eta l} \quad (10)$$

式中  $r$ ——物料空隙的半径,cm

$\Delta p$ ——物料中水的压差,Pa

$l$ ——渗透的距离,cm

在红外干燥条件下,物料的空隙半径  $r$  大,空隙迂曲度低,水在空隙中的渗透距离  $l$  较小,分解成小的水分子团簇后,水的粘度  $\eta$  降低,因此,水在空隙中具有更高的迁移速率。

## 4 讨论

胡萝卜中有许多供水运输的导管和毛细管<sup>[33]</sup>,这些管道在切面处与外部环境连通,形成水散失的通路,物料中的自由水主要沿着这些通路迁移。热风干燥过程中能量是由外向内通过热传导的方式传递的,因此,物料表面的水首先获取能量并进行迁移,物料表面快速失水出现一定程度的收缩,物料表面空隙随之变小,这就增大了内部水分向外迁移的阻力,降低了物料内部水分向外的迁移能力。红外辐射具有穿透作用,在红外干燥过程中,物料内外不同部位的水在吸收红外辐射能量后同时迁移,物料内外各部位失水率变化相近,内外空隙的收缩比接近,在相同失水率的情况下,经红外干燥的物料,空隙在各方向上受力均衡,空隙在不同方向上的收缩比差异小,空隙扭曲程度较低,加上水在空隙中的传

质过程持续而连贯,因此,空隙通道的通透性较高。

生物分子的生命活动与其周围的水合层是密切耦合在一起的,而且生物细胞内的水分子比自由水在结构上更加稳定有序<sup>[17]</sup>,更有利于细胞在其生命活动中发挥作用。在胡萝卜自由水含水率下降的过程中,胡萝卜细胞在接收到外部环境恶化的信号后,细胞中的部分疏水蛋白的折叠结构会向着亲水的折叠状态发生改变<sup>[17]</sup>,并与自由水结合在一起以增加细胞内结合水的含水率,以对抗细胞外部环境因缺水而带来的不利影响。因此,在干燥初期自由水减少的过程中,物料会出现结合水含水率增加的状况,这是胡萝卜细胞生命力作用的表现。随着物料中自由水含水率的降低,细胞的生命特征逐渐消失,细胞的自我保护和自我修复能力逐渐失去,细胞中的结合水开始向自由水方向转变。

大的水分子团簇能够帮助蛋白稳定在低亲和力的状态<sup>[34]</sup>,从而保证生物细胞中生物膜结构和蛋白质分子的相对稳定。在红外辐照作用下,大的水分子团簇会发生层级解构而形成小的水分子团簇,小的水分子团簇能够为质子传递提供多条氢键通道并用于光解作用<sup>[35]</sup>,从而促进膜结构中的磷脂分子层、糖蛋白、糖脂和蛋白质的水解。因此,在红外干燥的 TEM 图像上,细胞内的各种膜结构消失,各细胞器的体积减小。各种膜结构在逐渐降解的过程中,膜上逐渐出现孔径较大的通道,由式(6)、(7)可知,在分子扩散和克努森扩散的过程中,不易流动水的迁移速率都将会显著提升。

## 5 结论

(1) 红外辐照能量可以将物料中大的水分子团簇分解为小的水分子团簇,水的粘度下降,溶解力、渗透力、代谢力、扩散力、乳化力增强,自由水在物料空隙中的迁移能力增强。小水分子团簇的分子动力学特征发生改变,水合层中水分子与蛋白质、磷脂、糖类等有机质之间的耦合作用发生改变,镶嵌于生物大分子中的结合水的逸出能力增强,结合水和不易流动水的迁移能力增强。

(2) 与热风干燥相比,红外辐射能够对胡萝卜薄片的各个区域同时加热,水在物料空隙中的迁移持续而平稳,在与水的运动路径相垂直的空隙截面上,空隙壁所受应力的合力接近平衡力,经红外干燥后的物料,空隙排列规则、整齐,空隙形状差异小,空隙半径较大,空隙开阔,孔道畅通,这种空隙结构为水提供了良好的迁移路径。

(3) 在红外辐射干燥前期,辐射能量被胡萝卜薄片中的自由水吸收,并直接转化为水分子的动能,

避免了在干燥过程中因物料温度过高而引起的营养流失,因此,在干燥前期,宜采用较高的辐射功率和全波段辐射,以提高自由水的脱除速率。由于波长越短,红外线穿透能力越强,越有利于镶嵌在有机物分子链中的结合水的逸出,因此,在干燥后期,宜采

用较低的辐射功率和较短波长的红外线,这样既避免了物料因温度过高而引起有机物的变性,又有助于结合水的快速脱除,提高了干燥效率和果蔬干制品品质。本研究可为红外干燥工艺优化和红外干燥设备的改进提供理论依据和技术支持。

#### 参 考 文 献

- [1] THANIMKARN S, CHEEVITSOPON E, JONGYINGCHAROEN J S. Effects of vibration, vacuum, and material thickness on infrared drying of *Cissus quadrangularis* Linn[J]. *Heliyon*, 2019, 5(6): e01999.
- [2] ZHOU M, LI C, BI J, et al. Towards understanding the enhancement of moisture diffusion during intermediate-infrared drying of peach pomace based on the glass transition theory[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 54(8): 143 - 151.
- [3] 郭婷,何新益,邓放明,等. 利用 LF - NMR 探讨冻融处理影响甘薯膨化产品品质的机理[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(17): 279 - 285.  
GUO Ting, HE Xinyi, DENG Fangming, et al. Mechanism of freeze-thaw treatment influencing quality of puffing product for sweet potato using low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(17): 279 - 285. (in Chinese)
- [4] 吕为乔,韩清华,李树君,等. 微波干燥姜片模型建立与去水机理分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 233 - 237.  
LÜ Weiqiao, HAN Qinghua, LI Shujun, et al. Analysis of microwave drying model and water removing mechanism of ginger slices[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 233 - 237. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150434&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150434&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.034. (in Chinese)
- [5] PEON J, PAL S K, ZEWAİL A H. Hydration at the surface of the protein Monellin: dynamics with femtosecond resolution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002, 99(17): 10964 - 10969.
- [6] 孙传祝,石东岳,王相友,等. 单片物料厚度对胡萝卜红外薄层干燥水分迁移的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 59 - 65.  
SUN Chuanzhu, SHI Dongyue, WANG Xiangyou, et al. Effect of single material thickness on moisture transfer during infrared thin-layer drying of carrot[J]. *Food Science*, 2017, 38(13): 59 - 65. (in Chinese)
- [7] YANG P, WEN Z, DOU R, et al. Permeability in multi-sized structures of random packed porous media using three-dimensional lattice Boltzmann method [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 106: 1368 - 1375.
- [8] 张建平,赵林,谭欣. 改变水分子簇的结构及诱发的生物效应研究[J]. *天津理工大学学报*, 2003, 19(4): 8 - 12.  
ZHANG Jianping, ZHAO Lin, TAN Xin. Progress in changing the structure of water clusters and the [J]. *Journal of Tianjin University of Technology*, 2003, 19(4): 8 - 12. (in Chinese)
- [9] 庞小峰. 生命体吸收的红外光的非热生物效应的研究[J]. *物理*, 2001(9): 525 - 532.  
PANG Xiaofeng. Non-thermal biological effect of infrared light absorbed by living systems[J]. *Physics*, 2001(9): 525 - 532. (in Chinese)
- [10] 刘伟,范爱武,黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2006: 7 - 42.
- [11] KROPMAN M F, NIENHUYIS H K, BAKKER H J. Real-time measurement of the orientational dynamics of aqueous solvation shells in bulk liquid water[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(7): 077601.
- [12] PAL S K, ZEWAİL A H. Dynamics of water in biological recognition[J]. *Chemical Reviews*, 2004, 104(4): 2099 - 2124.
- [13] BAGCHI B. Water dynamics in the hydration layer around proteins and micelles[J]. *Chemical Reviews*, 2005, 105(9): 3197 - 3219.
- [14] LORIS R, LANGHORST U, DE VOS S, et al. Conserved water molecules in large family of microbial ribonucleases [J]. *Proteins*, 1999, 36(1): 117 - 134.
- [15] RASCHKE T M. Water structure and interactions with protein surfaces[J]. *Current Opinion in Structural Biology*, 2006, 16(2): 152 - 159.
- [16] BHATTACHARYYA S M, WANG Z G, ZEWAİL A H. Dynamics of water near a protein surface[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2003, 107(47): 13218 - 13228.
- [17] CHAPLIN M. Do we underestimate the importance of water in cell biology? [J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2006, 7(11): 861 - 866.
- [18] LEVITT M, SHARON R. Accurate simulation of protein dynamics in solution[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1988, 85(20): 7557 - 7561.
- [19] PAL S K, PEON J, BAGCHI B, et al. Biological water: femtosecond dynamics of macromolecular hydration[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(48): 12376 - 12395.
- [20] ROY S, JANA B, BAGCHI B. Dimethyl sulfoxide induced structural transformations and non-monotonic concentration dependence of conformational fluctuation around active site of lysozyme[J]. *Journal of Chemical Physics*, 2012, 136(11): 115103.
- [21] PERSSON E, HALLE B. Cell water dynamics on multiple time scales[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2008, 105(17): 6266 - 6271.
- [22] GUO P, TU Y, YANG J, et al. Water-COOH composite structure with enhanced hydrophobicity formed by water molecules

- embedded into carboxyl-terminated self-assembled monolayers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115(18): 186101.
- [23] 王永巍,王欣,刘宝林,等. 低场核磁共振技术检测煎炸油品质[J]. *食品科学*, 2012, 33(6): 179-183.  
WANG Yongwei, WANG Xin, LIU Baolin, et al. Application of low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) to analyze frying oil quality[J]. *Food Science*, 2012, 33(6): 179-183. (in Chinese)
- [24] 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.  
WANG Xueyuan, GAO Kun, CHEN Qinqin, et al. Water diffusion characteristics of apple slices during short and medium-wave infrared drying[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(12): 275-281. (in Chinese)
- [25] 宁正祥,黄志良. *食品生物化学*[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2006: 408.
- [26] 王相友,魏忠彩,孙传祝,等. 胡萝卜切片红外辐射干燥水分迁移特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 240-245.  
WANG Xiangyou, WEI Zhongcai, SUN Chuanzhu, et al. Moisture transfer characteristic of carrot slices by infrared radiation drying[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 240-245. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151232&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151232&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.032. (in Chinese)
- [27] 张绪坤,祝树森,黄俭花,等. 用低场核磁共振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 CSAE*, 2012, 28(22): 282-287. (in Chinese)
- [28] 夏宝林,丁超,章志华,等. 基于低场核磁成像技术研究稻谷缓苏的机理[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(11): 100-105.  
XIA Baolin, DING Chao, ZHANG Zhihua, et al. Researching on the mechanism of rice tempering using the low field magnetic resonance imaging technique[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(11): 100-105. (in Chinese)
- [29] 李安琪,武平仓. 特低渗透油藏微米尺度毛细管渗流界面特征[M]. 北京:石油工业出版社, 2014: 30-36.
- [30] 张建平. 改变水分子簇结构对传质过程的影响[D]. 天津:天津大学, 2003.  
ZHANG Jianping. Effections of structural changes of water clusters on mass transfer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- [31] 吴本玠. 红外技术与生物医学[C]//国电子学会生命电子学会委员会全体会议暨全国医疗电子学术交流会, 2001.
- [32] 廉明洋,李青山,杜善钊,等. 远红外线与小分子团水[C]//全国第十五届红外加热暨红外医学发展研讨会, 2015: 234-236.
- [33] 吉喜斌,康尔泗,陈仁升,等. 植物根系吸水模型研究进展[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(5): 1079-1086.  
JI Xibin, KANG Ersi, CHEN Rensheng, et al. Research advances about water-uptake models by plant roots[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(5): 1079-1086. (in Chinese)
- [34] GNANASEKARAN R, XU Y, LEITNER D M. Dynamics of water clusters confined in proteins: a molecular dynamics simulation study of interfacial waters in a dimeric hemoglobin[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2010, 114(50): 16989.
- [35] SAITO T, YAMANAKA S, KANDA K, et al. Possible mechanisms of water splitting reaction based on proton and electron release pathways revealed for CaMn4O5 cluster of PS II refined to 1.9 Å X-ray resolution[J]. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2011, 112(1): 253-276.

(上接第 366 页)

- [20] KIM B H, AKOH C C. Modeling of lipase-catalyzed acidolysis of sesame oil and caprylic Acid by response surface methodology: optimization of reaction conditions by considering both acyl incorporation and migration [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(20): 8033-8037.
- [21] 宋海东,魏安池,赵凯艳,等. 影响酶催化制备类可可脂过程中酰基位移和酯交换因素研究[J]. *粮食与油脂*, 2014, 27(2): 1-4.  
SONG Haidong, WEI Anchi, ZHAO Kaiyan, et al. Influence factors of acyl migration and enzymatic interesterification during cocoa butter equivalent produced by lipase-catalyzed reaction[J]. *Cereals & Oils*, 2014, 27(2): 1-4. (in Chinese)
- [22] XU X. Enzymatic production of structured lipids: process reactions and acyl migration [J]. *INFORM—International News on Fats, Oils and Related Materials*, 2000, 11(10): 1121-1130.
- [23] WANG B, FU J, LI L, et al. Medium-chain fatty acid reduces lipid accumulation by regulating expression of lipid-sensing genes in human liver cells with steatosis [J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2016, 67(3): 288-297.
- [24] 赵芳. 精炼过程对(n-3和n-6)型多不饱和油脂中反式脂肪酸的影响研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2012.  
ZHAO Fang. The studies on the effects of refining conditions on the trans fatty acids in (n-3/n-6) polyunsaturated oils [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [25] LU J, JIN Q, WANG X, et al. Preparation of medium and long chain triacylglycerols by lipase-catalyzed interesterification in a solvent-free system [J]. *Process Biochemistry*, 2017, 54(3): 89-95.
- [26] YUAN T, WEI W, WANG X, et al. Biosynthesis of structured lipids enriched with medium and long-chain triacylglycerols for human milk fat substitute [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2020, 128: 109255.
- [27] MU H, PORSGAARD T. The metabolism of structured triacylglycerols [J]. *Progress in Lipid Research*, 2005, 44(6): 430-448.