超声及超声渗透预处理对红外辐射干燥特性研究

张鹏飞，吕健，毕金峰，刘璇，周林燕，关云静，肖敏
（中国农业科学院农产品加工研究所，农业部农产品加工重点实验室，北京 100193）

摘要：为探究超声及超声渗透预处理对桃片水分迁移及红外辐射干燥特性的影响，经超声及超声渗透 30、60 min 预处理后，进行红外辐射 80 ℃干燥处理，采用低场核磁共振技术测定预处理后桃片横向弛豫时间 T_2 图谱，分析水分状态及分布变化，得到干燥特性曲线，并分析水分状态及分布对干燥特性的影响。结果表明，超声降低桃片固形物含量，超声渗透明显增加固形物含量并降低水分含量；不同预处理均改变桃片内部水分状态和分布。超声后，桃片不易流动水和自由水弛豫时间增加，水分自由度增加，从而提高干燥速率，增加水分有效扩散系数；超声渗透后，桃片结合水、不易流动水及自由水弛豫时间均减小，且自由水含量明显降低，而不易流动水及结合水含量相对升高，从而降低干燥速率，减小水分有效扩散系数。该研究为超声及超声渗透预处理对红外辐射干燥水分扩散研究提供参考。

关键字：超声；渗透；红外辐射；桃片；水分迁移
文章篇号：1673-9078(2016)11-197-202 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.11.030

Effect of Ultrasound and Ultrasound-assisted Osmotic Dehydration on Infrared Radiation Drying Characteristics of Peach Slices

ZHANG Peng-fei, LV Jian, BI Jin-feng, LIU Xuan, ZHOU Lin-yan, GUAN Yun-jing, XIAO Min
(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: To explore the effect of ultrasound (UL) and ultrasound-assisted osmotic dehydration (ULOD) pretreatments on water transfer in peach slices and the drying characteristics of infrared radiation drying, samples were pretreated with UL and ULOD for different time followed by infrared radiation drying at 80 ℃. Low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) was used to measure the transverse relaxation times (T_2) of the pretreated peach slices. Changes in water status and distribution were analyzed, the drying characteristics curve was obtained, and the effects of water status and distribution on the drying characteristics were explored. The results showed that UL decreased the soluble solid content, and ULOD significantly improved the soluble solid content and decreased the water content. Both pretreatments affected the water status and distribution. UL increased the transverse relaxation times of immobilized water (T_{22}) and free water (T_{23}), indicating that the degree of freedom of water increased. As a result, UL enhanced the drying rate and increased the water effective diffusion coefficient (D_{eff}). ULOD decreased the transverse relaxation time of bound water (T_{21}), immobilized water (T_{22}), and free water (T_{23}). The free water content was significantly reduced, and the immobilized water and bound water content increased relatively, thus reducing the drying rate and decreasing the D_{eff} of infrared radiation drying. This study provides the theoretical basis for the study of the effects of UL and ULOD pretreatments on water transfer and diffusion characteristics of fruite slice treated by infrared radiation drying.

Key words: ultrasound; osmotic dehydration; infrared radiation drying; peach slices; moisture transfer

桃果实后熟期，会出现呼吸高峰和乙烯释放高峰，导致桃果实感官品质降低、采后寿命缩短[1]。果蔬干制作为一种重要的加工途径，发展迅速，市场前景良好，是延伸桃加工产业链的重要趋势。目前，桃干制产品的研究主要集中在微波干燥、真空油炸-热风联合干燥、变温压差膨化干燥及红外辐射干燥等方面[2~3]。其中红外辐射干燥，是一种新兴果蔬干燥技术，具有高效、节能和环保的特点。预处理技术，包括微波、热烫、超声和渗透脱水等，可以缩短干燥时间，减小干燥成本，提高干燥产品品质，进而成为近年来果蔬干燥的研究热点[4,5]。

超声波作为一种物理能量形式，可使介质粒子振

收稿日期：2015-12-07
基金项目：公益性行业（农业）科研专项（201503142）
作者简介：张鹏飞(1990-)，男，硕士研究生，研究方向：农产品加工及贮藏工程
通讯作者：毕金峰(1970-)，男，博士，研究员，研究方向：果蔬加工理论与技术

动，引起超声空化现象，可使物料微观结构发生改变[6]。超声预处理可提高物料干燥速率、缩短干燥时间以及减少能量消耗，已成功应用于洋葱、胡萝卜、苹果和蘑菇等果蔬干燥中。渗透脱水(Osmotic Dehydration)是指在一定温度下，将原料浸入高渗透压溶液中除去部分水分的一种方法。超声波辅助渗透脱水（超声渗透）可以提高渗透过程中的传质效率，且可改善干燥产品的组织结构，提高干制产品复水性，丰富干制产品风味，保持产品较好的色泽[7]。超声及超声渗透预处理可影响物料内部水分状态及分布，从而影响物料干燥过程中水分扩散特性。但国内外对于物料超声及超声渗透预处理后的水分状态与干燥特性的研究较少。

本文以久保桃为原料，利用低场核磁共振（Low field nuclear magnetic resonance，LF-NMR）分析了预处理后桃片内部水分的状态及分布变化，研究了超声及超声渗透预处理对桃片红外辐射干燥特性的影响，以期为预处理在桃片生产上的应用提供理论依据，同时为开发新型果蔬脆片提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

原料为久保桃，采摘于北京平谷（2015/7/29），果实表面粉红与乳白色交替，为8~9成熟。麦芽糖为食品级，购于桂林顺来意食品有限公司。

1.2 主要设备与仪器

切片机：FA-200，广东省南海市德丰电热设备厂；手持阿贝折光仪：MASTER-2α，日本日立公司；电子天平：AUW220型，日本岛津公司；超声波发生器（工作频率40 KHz，功率500 W）：KQ-500Z型，昆山市超声仪器有限公司；红外辐射干燥箱，圣泰科红外科技有限公司；万能粉碎机：FW 100，天津市泰斯特仪器有限公司；核磁共振分析与成像系统：MesoMR型，上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料处理

桃去皮去核后，切成厚度 10 mm、直径 20 mm 的圆柱状，迅速将桃片贮于-18 ℃冰柜中。实验前，将桃片从冰柜中取出置于聚乙烯包装袋中，常温下解冻 60 min。采用 105 ℃恒温干燥法得到其初始干基水分含量为 9.74（d.b）。

1.3.2 超声预处理

将桃片摆在不锈钢栏框内置于超声波水浴中处理，温度设定为 40 ℃，料液比设定为 1:10。本实验中，超声 70 min 左右时，桃片出现糜烂现象，组织软化严重。有研究表明长时间的超声处理，会明显破坏果蔬组织结构明显破坏[8]。因此，超声预处理时间设定为 30 及 60 min（UL-30，UL-60）。由于超声处理过程中水温会上升，本实验采用冷却水循环装置控制其温度变化范围为±1 ℃。采用水分损失率（Water loss，WL）、固形物增加率（Solids gain，SG）评价预处理效率。WL 及 SG 计算公式[9]如下：

$$WL(\mathrm{g/g}) = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$SG(\mathrm{g/g}) = \frac{m - m_0}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中，M_0-原料初始鲜重（g）；M-原料某时刻鲜重（g）；m_0-原料初始干重（g）；m-原料某时刻干重（g）。试验重复3次，取平均值。

1.3.3 超声渗透预处理

选用50 °Brix（用阿贝折光仪校准）的麦芽糖溶液作为渗透液，渗透温度设定为40 ℃；料液比设定为1:10，以防止渗透过程中出现稀释现象。超声渗透时间设定为30及60 min（ULOD-30，ULOD-60）。渗透结束后，将桃片迅速取出渗透液，用流动的水清洗表面附着的糖液，并用吸水纸吸除表面水分。

1.3.4 红外辐射干燥

物料经以上预处理后单层平铺放入已工作稳定的红外箱的托盘。固定温度80 ℃、辅助强度（0.8 W cm^{-2}）及出口风速（1 m/s），前1 h每10 min记录样品质量变化，之后每30 min记录样品质量变化，直至水分含量（湿基）到达9~12%，停止试验。

1.4 干燥特性评价

水分比（moisture ratio，MR）用于表示一定干燥条件下样品的剩余含水率，计算公式如下：

$$\mathrm{MR} = \frac{\mathrm{M} - \mathrm{M_e}}{\mathrm{M_0} - \mathrm{M_e}} \quad (3)$$

式中，M-样品任意时刻的干基含水率，M_e-样品的平衡干基含水率，M_0-样品的初始干基含水率。

干燥速率（drying rate，DR）计算公式如下：

$$\mathrm{DR} = \frac{\mathrm{M_{t1}} - \mathrm{M_{t2}}}{\mathrm{t_2} - \mathrm{t_1}} \quad (4)$$

式中，M_{t1}和M_{t2}分别为干燥到t_1和t_2时样品的干基含水率，g/g；t_1和t_2为对应的干燥时间，min。

当长方形、圆柱形和球形等形状的物料的干燥阶段处于降速干燥时，可以用菲克扩散方程来描述其干

燥特性。在降速阶段，湿分主要依靠主根内部水分的迁移，故可通过有效水分扩散系数D_{eff}来反映内部水分迁移过程。假设所有的样品都有相同的初始水分分布且忽略样品在干燥过程中的收缩，那么样品的有效扩散系数满足如下方程[10]：

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp(-\frac{(2n+1)^2\pi^2D_{eff}t}{4L^2}) \quad (5)$$

式中，D_{eff}-样品的水分有效扩散系数，m^2/s；L-样品厚度的一半，m；t-干燥时间，s；n-考虑的组数。

对于长时间的干燥，上式可以简化,并以此计算出D_{eff}。方程如下：

$$MR=\frac{8}{\pi^2}\exp(-\frac{\pi^2D_{eff}t}{4L^2}) \quad (6)$$

1.5 低场核磁共振测定水分弛豫时间

试验中应用MesoMR型核磁共振分析与成像系统，主频为23 MHz，磁体温度为32 ℃，线圈直径为60 mm，磁场强度为0.5 T。采用核磁共振软件中的CPMG（Carr-Purcell-Meiboom-Gill）脉冲序列测定不同预处理后的桃片中水分的自旋-自旋弛豫时间T_2。将桃片放入永磁场中心位置的射频线圈中心，进行T_2采集，将得到的信号值通过核磁共振T_2反演软件进行反演得到T_2反演谱。CPMG脉冲序列参数为：90 °脉冲时间7 μs，180 °脉冲时间13 μs，采样点数1203046，重复时间5000 ms，累加次数8次，回波数15000。

1.6 可溶性固形物含量测定

采用手持阿贝折光仪测定桃片可溶性固形物含量（Total soluble solids，TSS）。

1.7 数据分析

采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析，运用方差分析和 Duncan 多重比较，显著性差异水平 $p<0.05$。采用 Origin 8.0 软件进行模型拟合、回归分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 不同预处理对桃片 WL 及 SG 的影响

超声及超声渗透预处理对桃片 WL 及 SG 的影响如表 1 所示。经过不同预处理，桃片内部水分均会损失。相对于超声预处理，超声渗透对 WL 影响更大，且随着超声渗透时间增加，WL 升高，桃片水分含量明显降低。Xin Ying 等[11]对西兰花进行超声渗透实验结果表明，超声渗透 10、20 及 30 min，WL 分别为 0.76%、0.95%及 1.20%，西兰花内部水分在高渗透压作用下迁移至渗透溶液，随着超声渗透时间增加，引起的空穴效应增强，水分损失升高。经过超声预处理，桃片固形物含量降低，且随着超声时间增加，固形物损失量越大。Mothibe 等[4]对苹果进行超声预处理的研究表明，浓度梯度引起可溶性固形物如可溶性糖类、矿物质、有机酸、风味物质和色素等，由物料内部转移至渗透液中。经过超声渗透预处理，桃片固形物含量升高，且随着超声渗透时间增加，SG 越大，经 ULOD-30、ULOD-60 处理后，桃片 SG 分别为 0.50%、1.68%。虽然超声渗透过程中，桃片内部固形物会渗出至渗透液，但渗透液中麦芽糖在渗透压作用下大量渗入桃片内部导致 SG 增加。Fernandes 等[12]研究表明超声破坏物料细胞结构，并在物料表面产生许多微观通道，可加速渗透过程中质量传递。

TSS 变化可反映桃片预处理后 SG 变化。由表 2 可知,不同预处理对桃片可溶性固形物含量影响显著。与鲜样对比，超声预处理后，桃片 TSS 含量降低，UL-30 处理组含量最低，为 3.80%；超声渗透预处理后，桃片 TSS 含量升高，ULOD-60 处理组含量最高，为 14.93%。因此，运用超声预处理可生产低糖、低卡路里的产品,从而可更好地将迎合消费者的价值取向。

表 1 不同预处理对 *WL* 及 *SG* 的影响

Table 1 Effects of different pretreatments on WL and SG

预处理	WL	SG	TSS/%
Fresh	-	-	9.23 ± 0.12^{c}
UL-30	5.49 ± 0.96	-3.11 ± 0.06	5.10 ± 0.10^{d}
UL-60	4.52 ± 0.95	-4.23 ± 0.11	3.80 ± 0.10^{e}
ULOD-30	26.27 ± 1.56	0.50 ± 0.25	11.73 ± 0.06^{b}
ULOD-60	36.88 ± 1.21	1.68 ± 0.20	14.93 ± 0.12^{a}

注：-表示空白；同一列同一指标的不同字母表示不同处理对照差异显著。

2.2 水分状态与干燥特性

不同预处理导致桃片内部水分及固形物含量发生变化，从而引起水分状态及分布的变化，而干燥可以看作是不同状态的水分按自由度大小逐个脱除的过程[13]，因此探究不同预处理后水分状态及分布变化对桃片红外辐射干燥特性研究有重要意义。由于水分存在于细胞壁、细胞质、细胞外空隙和液泡等不同细胞间隔区域，可将水分状态分为结合水、不易流动水和自由水[14]。图1为鲜样及不同预处理后的桃片水分T_2反演图谱。图中每个曲线都有3个波峰，代表样品中存在3种状态的水分。T_{21}（0.01~10 ms）表示结合水；T_{22}（10~100 ms）表示不易流动水水，流动性介于结合水和自由水之间；T_{23}（100~1000 ms）表示自由水，该

结果与胡萝卜测定结果基本一致[13]。弛豫时间越短，说明水分流动性越小，这部分水与细胞骨架、酶和高浓度细胞溶质等底物结合越紧密；弛豫时间越长，水分流动性越强，自由度越大，其质子的化学交换介于水和糖类或其他低分子量化合物构成的稀溶液中。由图1可知，鲜样桃片中水分主要存在形态为自由水，其次为结合水，不易流动水所占比例最小。超声及超声渗透预处理后，3种状态水分依然存在，但对桃片T_2及信号幅度均有影响。

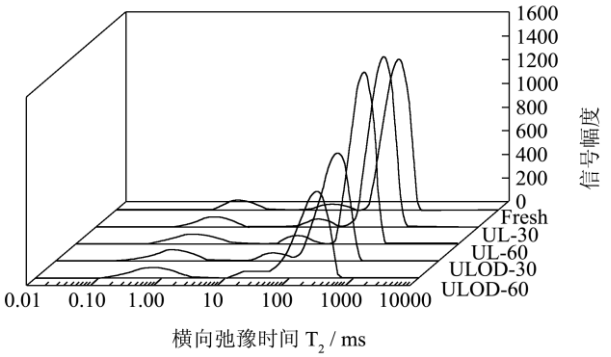


图 1 不同预处理后桃片内部水分横向弛豫时间 T_2 反演图

Fig.1 Transverse relaxation times (T_2) of water inside peach slices after different pretreatments

不同预处理对桃片T_2及对应的信号幅度（即峰面积比例）的影响如表2所示。鲜样中自由水比例最大，占总水分89.20%，其次为结合水，不易流动水所占比例最小，仅为3.62%。超声及超声渗透预处理后，桃片T_{21}相对于鲜样均减小，且不同预处理间没有显著性差异；A_{21}相对于鲜样均升高，ULOD-60处理组A_{21}最高，为13.06%。经过超声预处理，桃片T_{22}升高，A_{22}升高，但与鲜样A_{22}无显著性差异；桃片T_{23}升高，A_{23}减小。经过超声渗透预处理，桃片T_{22}降低，A_{22}升高，且与鲜样及超声预处理组有显著性差异；桃片T_{23}减小，ULOD-60处理组T_{23}最低，为244.05 ms，桃片A_{23}减小。

水分弛豫时间T_2及对应峰面积变化与预处理过程中WL及SG相互关联。超声预处理对桃片各组分水分峰面积比例影响较小，这也证实了表1中超声预处理对WL影响较小。但经过超声预处理后，桃片各组分水分，尤其是不易流动水及自由水弛豫时间均增加，说明水分流动性及自由度提高。这主要是因为超声预处理后，桃片内部可溶性固形物损失（尤其果糖、葡萄糖及蔗糖），与之相结合的水分不再被束缚[4]，导致弛豫时间增加。

超声渗透预处理引起桃片内部水分损失较大，且研究表明渗透脱水过程主要是液泡中自由水变化过程[14]，结合水与内部物质分子呈化合状态，性质稳定，不易去除[15]。经过超声渗透预处理，不同组分水分T_2均减小。Xin Ying等[11]以海藻糖为渗透液对西兰花进行了超声渗透实验，结果表明，海藻糖渗入到西兰花会增加内部粘度，并于质子发生化学交换，从而导致弛豫时间减小。由于渗透过程中损失的水分主要为自由水，因此A_{23}减小；而A_{22}及A_{21}增加可能由于A_{23}减小导致其相对含量升高，也可能由于在渗透过程中液泡中的自由水向细胞质及细胞壁迁移，从而导致不易流动水及结合水所占比例升高。Xin Ying等[11]研究发现，西兰花进行超声渗透30 min后，自由水所占比例由94.6%减少为90.5%，不易流动水所占比例由4.7%增加为8.1%，这表明西兰花液泡中的自由水向细胞质移动，从而导致不易流动水所占比例升高。

表 2 不同预处理对桃片水分弛豫时间 T_2 及对应峰面积的影响

Table 2 Effects of different pretreatments on relaxation times (T_2) and corresponding peak areas of peach slices

预处理	结合水横向弛豫时间 T_{21}/ms	峰面积比例 A_{21}/%	不易流动水横向弛豫时间 T_{22}/ms	峰面积比例 A_{22}/%	自由水横向弛豫时间 T_{23}/ms	峰面积比例 A_{23}/%
Fresh	0.87±0.09^{a}	6.79±0.01^{d}	27.11±3.54^{abc}	3.62±0.34^{b}	273.56±17.38^{b}	89.20±2.05^{a}
UL-30	0.74±0.08^{b}	7.49±0.90^{d}	32.25±4.50^{a}	3.86±0.52^{b}	337.02±39.61^{a}	88.39±1.18^{ab}
UL-60	0.71±0.08^{b}	8.86±0.46^{c}	30.19±5.11^{ab}	4.07±0.38^{b}	337.02±39.61^{a}	87.00±0.55^{b}
ULOD-30	0.69±0.08^{b}	11.43±0.91^{b}	26.01±1.92^{c}	5.01±0.21^{a}	271.61±54.70^{b}	83.29±0.97^{c}
ULOD-60	0.69±0.08^{b}	13.06±0.60^{a}	22.97±4.53^{c}	4.81±0.90^{a}	244.05±33.40^{b}	81.85±0.61^{d}

注：同一列同一指标的不同字母表示不同处理对照差异显著。

不同预处理对桃片红外辐射干燥特性的影响如图2 所示，经过超声预处理后，桃片初始干基水分含量升高，但干燥速率大幅提高；经过超声渗透预处理后，桃片初始干基水分含量降低，但干燥速率降低。UL-60处理组干燥速率最高，但干燥 60 min 左右，与 UL-30处理组干燥速率差异不大，ULOD-60 处理组干燥速率最低。由图可知，干燥 85 min 左右，超声预处理桃片水分含量已低于超声渗透预处理桃片。干燥 180 min 时，超声预处理组桃片水分含量达到恒定值，UL-30、UL-60、ULOD-30、ULOD-60 及对照组水分含量分别为 0.12、0.10、0.17、0.15 及 0.17。

超声预处理明显提高干燥速率，主要因为超声预

处理后桃片水分状态和分布发生变化，自由水和不易流动水的自由度增加，流动性加强，受到桃片内部固形物及离子等的束缚减小[4]，从而利于提高干燥速率。同时，超声作用导致细胞结构发生破坏，细胞结构上产生许多微观通道[12,16]，从而加速了水分的扩散。虽然超声渗透预处理也会破坏细胞结构，但是在渗透过程中麦芽糖渗入桃片内部，与桃片内部水分子交互作用。此外，在干燥过程中，桃片表面会形成致密的结晶，从而导致干燥时间增加，干燥速率上升[7]。

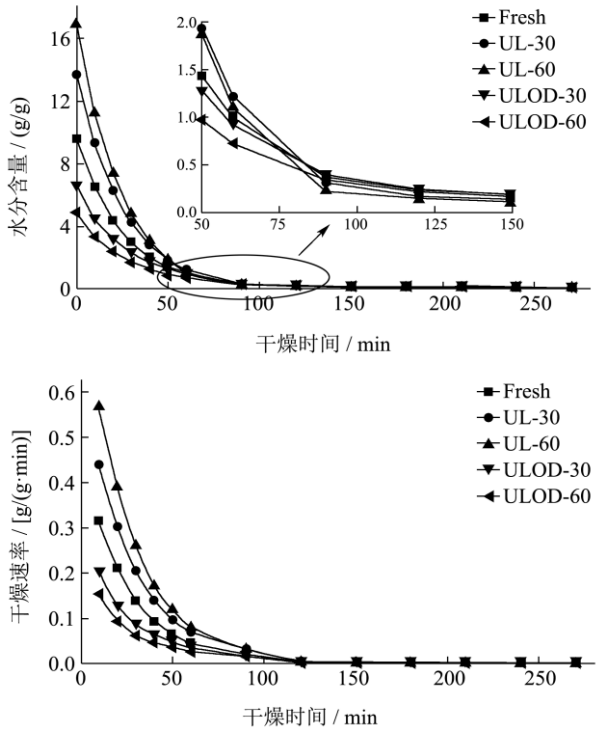


图2 不同预处理对桃片干燥水分含量及速率的影响

Fig.2 Influence of different pretreatments on the moisture content and drying rate

表3 不同预处理对桃片红外辐射干燥水分有效扩散系数的影响

Table 3 Moisture effective diffusion coefficients of peach slices after different pretreatments

预处理	有效扩散系数 D_{eff}/(m²/s)	R^2
Fresh	1.46×10^{-8}	0.9441
UL-30	2.05×10^{-8}	0.9730
UL-60	2.26×10^{-8}	0.9672
ULOD-30	1.28×10^{-8}	0.9510
ULOD-60	1.13×10^{-8}	0.9423

运用菲克第二定律计算桃片超声渗透-红外辐射干燥水分有效扩散系数，结果如表3所示。由表3可知，超声预处理后，桃片红外辐射干燥D_{eff}增加，且UL-30及UL-60处理组D_{eff}分别为2.05×10^{-8}、2.26×10^{-8} m²/s；超声渗透预处理后，桃片红外辐射干燥D_{eff}减小，且ULOD-30及ULOD-60处理组D_{eff}分别为1.28×10^{-8}、1.13×10^{-8} m²/s。Fernandes等[17]对菠萝进行超声预处理后，发现超声预处理可增加菠萝热风干燥的扩散系数。而超声渗透预处理由于麦芽糖的渗入，湿分扩散到表面阻力加大，从而影响对原料内部水分迁移。

3 结论

3.1 超声预处理对桃片内部水分含量影响较小，但可降低可溶性固形物含量。超声渗透预处理可明显降低桃片水分含量，麦芽糖的渗入使固形物含量增加。

3.2 超声预处理和超声渗透预处理均可以改变桃片内部水分状态和分布。超声预处理后，桃片不易流动水和自由水弛豫时间增加，水分流动性和自由度增加。超声渗透预处理后，桃片结合水、不易流动水及自由水弛豫时间均减小，且自由水含量明显降低，而不易流动水及结合水含量相对升高。

3.3 超声预处理可提高桃片红外辐射干燥速率，减少干燥时间，增加水分有效扩散系数。超声预处理30 min与60 min对干燥速率的影响差别不明显。超声渗透预处理降低干燥速率，减小水分有效扩散系数。综合考虑，超声30 min可作为桃片红外辐射干燥预处理，从而节约生产时间和能耗。

参考文献

[1] Manganaris G A, Vasilakakis M, Diamantidis G, et al. Effect of calcium additives on physicochemical aspects of cell wall pectin and sensory attributes of canned peach (*Prunus persica* (L) Batsch cv Andross) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(10): 1773-1778

[2] 吕健,毕金峰,卢勇,等.响应面法优化桃变温压差膨化干燥工艺[J].中国食品学报,2014,6:110-120
LV Jian, BI Jin-feng, LU Yong, et al. Optimization of explosion puffing drying at modified temperature and pressure for peaches by response surface methodology [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 6: 110-120

[3] 张鹏飞,吕健,周林燕,等.桃片超声渗透-红外辐射干燥特性及能耗研究[J].现代食品科技,2015,11:234-241
ZHANG Peng-fei, LV Jian, ZHOU Lin-yan, et al. Drying characteristics and energy consumption of peach slices during ultrasound-assisted osmotic dehydration in combination with infrared radiation [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 11: 234-241

[4] Mothibe K J, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Effects of ultrasound and microwave pretreatments of apple before

spouted bed drying on rate of dehydration and physical properties [J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1848-1856

[5] An K, Li H, Zhao D, et al. Effect of osmotic dehydration with pulsed vacuum on hot-air drying kinetics and quality attributes of cherry tomatoes [J]. Drying Technology, 2013, 31(6): 698-706

[6] 张慜,曹晖.食品渗透脱水研究进展[J].干燥技术与设备,2005,4:3-9
ZHANG Min, CAO Hui. Research and development of osmotic dehydration [J]. Drying Technology and Equipment, 2005 4: 3-9

[7] Zou K, Teng J, Huang L, et al. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 253-259

[8] Mulet A, Carcel J A, Sanjuan N, et al. New food drying technologies-Use of ultrasound [J]. Food Science and Technology International, 2003, 9(3): 215-221

[9] Yadav B S, Yadav R B, Jatain M. Optimization of osmotic dehydration conditions of peach slices in sucrose solution using response surface methodology [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(5): 547-555

[10] Doymaz İ. Infrared drying of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) slices [J]. Journal of Food Science and Technology, 2012, 49(6): 760-766

[11] Xin Y, Zhang M, Adhikari B. Effect of trehalose and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water and glass transition temperature of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.) [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119(3): 640-647

[12] Fernandes F A N, Rodrigues S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits [J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1509-1516

[13] 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 Xu-kun, ZHU Shu-sen, HUANG Jian-hua, 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, 2012, 28(22): 282-287

[14] Panarese V, Laghi L, Pisi A, et al. Effect of osmotic dehydration on Actinidia deliciosa kiwifruit: A combined NMR and ultrastructural study [J]. Food Chemistry, 2012, 132(4): 1706-1712

[15] Vicente S, Nieto A B, Hodara K, et al. Changes in structure, rheology, and water mobility of apple tissue induced by osmotic dehydration with glucose or trehalose [J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(8): 3075-3089

[16] 严小辉,余小林,胡卓炎,等.超声预处理对半干型荔枝干干燥时间的影响[J].农业工程学报,2011,27(3):351-356
YAN Xiao-hui, YU Xiao-lin, HU Zhuo-yan, et al. Effects of ultrasound pretreatment on drying time for intermediate-dried litchi [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 351-356

[17] Fernandes F A N, Linhares F E, Rodrigues S. Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2008, 15(6): 1049-1054