doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.032

胡萝卜切片红外辐射干燥水分迁移特性研究*

王相友1魏忠彩1孙传祝2张丽丽1

(1.山东理工大学农业工程与食品科学学院,淄博 255049;2.山东理工大学机械工程学院,淄博 255049)

摘要:为探究红外辐射干燥胡萝卜切片内部水分迁移特性,进行了辐射温度为60℃、切片厚度为5mm时的胡萝卜 切片红外干燥试验,并利用低场核磁共振波谱法对胡萝卜切片横向弛豫时间 T₂ 图谱进行了分析。试验结果表明, 红外辐射干燥过程中自由水和半结合水的横向弛豫时间 T₂ 显著大于热风干燥;峰面积 A₀ 的衰减速度明显快于热 风干燥,即干燥速率、水分变化梯度显著高于热风干燥;试验还得出了红外辐射和热风干燥胡萝卜切片的峰面积随 干燥时间衰减趋势拟合方程。试验数据为进一步研究胡萝卜切片的精细化干燥和优化干燥工艺奠定了基础。 关键词: 胡萝卜切片 水分迁移 横向弛豫时间 红外辐射 热风干燥 中图分类号: S226.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)12-0240-06

Moisture Transfer Characteristic of Carrot Slices by Infrared Radiation Drying

Wang Xiangyou¹ Wei Zhongcai¹ Sun Chuanzhu² Zhang Lili¹

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

Abstract: The drying process is one of the most important processes in food engineering. Infrared radiation drying is a process of non-steady-state heat and mass transfer, with the change of material moisture migration and quality characteristics. Heat and moisture transfers in fruits and vegetables during drying are complex processes, and knowledge of the moisture profile is fundamentally important for industrial processes. A better understanding of the mechanism of moisture transfer would help to improve product quality and the efficiency of drying process for fruits and vegetables. Low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) has the technique advantages of nondestructive and non-invasive, which can be used to study the variation, distribution and flow of different phases state moisture in fruits and vegetables. The study of regularity of moisture migration was the foundation for optimizing drying parameters. With the radiation temperature of 60°C and the thickness of the carrot slices of 5 mm, the tests of infrared drying were made. The spectra of transverse relaxation time T_2 were analyzed by using the method of low field magnetic resonance spectroscopy (LF-MRS) to explore the moisture transfer characteristics of carrot slices dried by infrared radiation (IR). The results showed that in comparison with hot air drying, the values of transverse relaxation time T_2 of free water and semi-bound water from the process of infrared radiation drying were much greater, and the decay rate of the peak area A_0 from the process of infrared radiation drying was also faster, which meant that the drying rate and moisture gradient were much higher. The fitting equations of the peak area A_0 versus drying time was obtained with attenuation trend for carrot slices dried by infrared radiation and hot air. The results could lay a solid foundation for the further study on refinement drying and the drying technique optimizing for carrot slices. Key words: Carrot slices Moisture transfer Transverse relaxation time Infrared radiation Hot air

drying

收稿日期: 2015-09-17 修回日期: 2015-10-16

^{*}国家自然科学基金资助项目(31271908)

作者简介:王相友,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术及装备研究,E-mail: wxy@ sdut.edu.cn

241

引言

新鲜胡萝卜常因含水率高、微生物的繁殖及酶的活性难以抑制,在自然条件下贮存时间较短,因此一般采用干燥脱水的方法对胡萝卜进行加工处理,以延长其货架期^[1-2]。由于所采用的干燥方式不同,其干燥品质也有所差别。水分对果蔬贮藏品质、质构特性、物化特性等有重要影响^[3],果蔬自身纤维组织、水分分布均具有各向异性,研究物料干燥过程中水分迁移特性,对优化干燥参数及工艺、设计干燥设备极其重要^[4]。为此,一些学者在胡萝卜干制方面进行了研究^[5-9]。

核磁共振是一种无损、快速测量技术,其成像法 和波谱法分别可从宏观及微观角度来分析试验样品 的水分迁移特性。国内外学者在农产品干燥、猪肉 保水性、作物根系无损检测、烫漂对甜玉米的水分分 布及状态变化等方面利用核磁共振技术做了相关研 究^[10-14]。张绪坤等^[5]和徐建国等^[7]用核磁共振成 像法和波谱法研究了热风干燥胡萝卜切片的水分迁 移。

本文对胡萝卜切片进行红外辐射温度为 60℃ 时的干燥试验,通过核磁共振分析仪 CPMG 序列采 集的试验数据可得到横向弛豫时间 *T*₂ 的反演谱,来 探索红外辐射干燥胡萝卜切片的水分迁移特性,并 与相同温度条件下热风干燥的弛豫信息进行比较, 以探讨合理的干燥工艺流程及参数。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

优质胡萝卜(购自当地超市,要求新鲜清洁,同 一品种、同一尺寸等级);红外辐射试验箱(苏州奥 峰烘箱制造有限公司);热风恒温干燥箱(上海叶拓 仪器仪表有限公司);New Classic MF 电子天平(最 大称量 220 g,最小称量 0.1 mg,瑞士梅特勒 – 托利 多国际股份有限公司);PQ001 型食品核磁共振分析 仪(磁场强度(0.5±0.08)T,仪器主频率 21.3 Hz, 探头线圈直径 25 mm,磁体温度 32℃,上海纽迈电子 科技有限公司);若干料盘及样品厚度可调刀具;镊 子;与试验样品直径一致的模具等。

1.2 核磁共振用于测量水分的原理

低场核磁共振波谱法(Low field magnetic resonance spectroscopy, LF-MRS)是通过傅里叶公式 把试验样品的磁共振信号变换成波谱(频率)的一 种微观分析方法。横向弛豫时间 T_2 的长短因 H 质 子所处的化学环境不同而变化。横向弛豫时间 T_2 越长,H 质子的自由度越大,所受的束缚力越小,其 水分越容易被脱除;反之,横向弛豫时间 T₂ 越短则 水分越难脱除。横向弛豫时间 T₂ 的变化可以反映 出各种状态水分的流动特性以及含水率变化,故在 此基础上可以探讨胡萝卜红外辐射干燥时的水分迁 移特性^[15]。反演后得到的横向弛豫时间 T₂ 图谱的 每个波峰均对应不同状态的水分,且波峰的信号幅 度、峰面积可以表征所对应状态含水率以及所占比 例。胡萝卜切片干燥试验样品的横向弛豫时间 T₂ 因干燥方式、干燥时间的不同均有变化,反映了样品 内部 H 质子所处的化学环境,与 H 质子所受的束缚 力及自由度有关,而 H 质子的束缚程度与样品的内 部水分通道、纤维组织结构密切相关。

1.3 试验方法与步骤

胡萝卜去樱、洗净、晾干,切制成直径 24 mm、厚 度 5 mm 的切片作为标准样本,试验样本均分成 2 份,称量后分别放入料盘中用保鲜膜覆盖备用。 将试验样本置于达到设定温度的红外干燥试验箱进 行试验。本文将红外辐射温度设定为 60° 、辐射距 离为 150 mm,并与 60° 热风干燥试验进行对比。取 3 个标准胡萝卜样本作为一组样本,把 3 个样本作 为整体来进行核磁共振信号采集,数值计算均把 3 个样本作为一个整体。含水率测定按照 105° 干燥法,将进行核磁共振信号采集后的试验样本置于 热风干燥箱中,每 30 min 称量一次,直至相邻 2 次 称量的质量差值小于 0.001 g 时,认定为达到绝干 程度。红外辐射干燥和热风干燥试验的编号分别为 IR - x 和 HA - x,其中 x 是取样次数,新鲜样品试验 编号分别命名为 IR - 0 和 HA - 0。

1.4 核磁共振信号采集及参数设置

使用 PQ001 分析软件及 CPMG 序列采集信号, 使用迭代寻优的方法将采集到的 T₂ 衰减曲线代入 弛豫模型中拟合并反演可以得到样品的 T₂ 弛豫信 息,包括弛豫时间及其对应的弛豫信号分量。干燥前 期,信号幅度较高,采样曲线光滑,信噪比较大,参数 设置为:接收机带宽 100 kHz,主频 18 MHz,采样时间 控制参数 0.15 ms,偏移频率 172 128.72 Hz,增益 20.0 dB,90°脉宽 4.5 µs,180°脉宽 9.52 µs,信号采样 点数 539 136,重复时间 7 000 ms,累加次数 4 次,回波 时间 0.3 ms,回波数 18 000。干燥后期样品水分较 少,得到的采样曲线信噪比也较小,为减小测量误差, 将参数调节如下:重复时间 3 500 ms,累加次数 8 次, 回波数 12 000。因本次试验选用的为大功率密度红 外辐射试验箱,干燥样品每 15 min 采集一次信号。

2 结果与分析

由于加热温度过低会导致干燥效率下降,温度

过高易"结壳"影响干燥速率且干燥品质变差^[5],在 前期大量胡萝卜切片干燥试验研究的基础上^[3],本 文从最佳温度区间选取 60℃进行红外辐射干燥试 验。在干燥过程中,使用 OriginPro 8.5 软件对试验 数据进行处理,做出新鲜样本及红外辐射干燥条件 下的 *T*₂ 图谱和峰面积变化曲线,与热风干燥进行分 析对比。试验样品干燥至湿基含水率为 8% 以下终 止试验。红外辐射干燥在无热风辅助状态下进行。 热风干燥在恒温干燥箱(上海叶拓仪器仪表有限公 司)内进行,由于试验时物料较少,湿度虽然有所变 化但不会影响干燥过程。为提高数据分析精确性, 对试验数据进行标准化处理,得到每单位质量样品 (忽略干物质影响)对应的测试信号量。

横向弛豫时间 T₂ 标准化处理可描述为

$$T_{y} = \frac{T_{x}}{M} \tag{1}$$

式中 *T_x* —— 软件反演后的横向弛豫时间 *T_y* ——标准化处理后的横向弛豫时间 *M* —— 对应胡萝卜切片的质量 峰面积 *A_i* 标准化处理可描述为 *A_c*

$$A_{y} = \frac{A_{x}}{M} \tag{2}$$

式中 A_x——软件反演后的峰面积 A_x——标准化处理后的峰面积

2.1 胡萝卜切片横向弛豫时间 T₂ 图谱

2.1.1 新鲜胡萝卜切片 T, 图谱

新鲜胡萝卜切片的横向弛豫时间T2图谱如

图 1 所示,其横坐标为按对数分布的横向弛豫时间分量 T₂,纵坐标为各横向弛豫时间对应的信号 幅度。



由图1知,新鲜胡萝卜中含有3种状态的水分, *T*₂₁(1~10 ms)对应的水分是与细胞内部物质结合 紧密的结合水,*T*₂₂(10~100 ms)对应的水分是受一 定束缚力约束的半结合水,*T*₂₃(100~2000 ms)对应 的水分是游离在纤维组织之间流动性较大的自由 水。试验样品横向弛豫时间*T*₂越长(图1中峰位置 相对于坐标原点越靠右),H质子的自由度也越大, 所受的束缚力越小,说明水分与胡萝卜自身纤维组 织的结合程度越弱,其水分越容易被脱除。反之,*T*₂ 越短则水分越难脱除。

2.1.2 红外辐射干燥胡萝卜切片 T₂ 图谱

表1为红外辐射干燥胡萝卜切片的 T₂ 弛豫信息,"一"表示样品不存在此峰或此峰与其他峰出现了"融合"现象。

表 1 红外辐射干燥胡萝卜切片的 T₂ 弛豫信息(标准化处	;理)
-------------------------------	-----

Tab. 1 T_2 relaxation information of carrot slices dried by infrared radiation (standardized treatment)

试验 编号	干燥时 间/min	T_{21}/ms	$\frac{A_{21}}{A_0} / \%$	A ₂₁	T_{22}/ms	$\frac{A_{22}}{A_0}$ /%	A ₂₂	T_{231}/ms	$\frac{A_{231}}{A_0} / \%$	A ₂₃₁	T_{232}/ms	$\frac{A_{232}}{A_0} / \%$	A ₂₃₂	A_0
IR – 0	0	4.642	1.036	16.921	37.649	2.637	43.056	_	—	_	464.159	95.728	1 562. 860	1 632. 612
IR - 1	15	1.520	0.538	6.763	12.328	2.757	34.637	265.609	78.452	985.744	932.603	18.253	229.352	1 256. 496
IR - 2	30	1.748	0.851	8.348	12.328	3.715	36.439	200. 923	64.709	634.729	1 072. 267	30.725	301.381	980. 896
IR – 3	45	1.000	0.937	7.066	12.328	5.569	41.995	174.753	56.938	429.365	932.603	36.556	275.669	754.095
IR - 4	60	0.572	1.096	6.078	9.326	8.879	49.220	132. 194	51.637	286.260	932.603	38.388	212.814	554.372
IR - 5	75	0.870	3.298	12.702	_	_	—	114.976	72.053	277.544	705.480	24.649	94.948	385.194
IR - 6	90	0.756	3.789	10.571	10.723	16.346	45.612	86.975	79.865	222.850	—	—		279.033
IR - 7	105	0.327	6.714	13.637	—	—	—	37.649	92.157	187.191	533.670	1.129	2.293	203.121
IR - 8	120	1.000	14. 262	19.217	_	_	—	12.328	83.836	112.963	305.386	1.901	2.562	134.743
IR – 9	135	2.009	53.219	48.561	8.111	44.016	40.164	_	—	—	100.000	1.674	1.527	91.248
IR – 10	150	0.327	30. 948	22.812	2.310	64.949	47.874	_	_		132. 194	3.185	2.348	73.710

注: T₂₃₁、T₂₃₂指半结合水和自由水对应的横向弛豫时间; A₂₁、A₂₂、A₂₃₁、A₂₃₂指 T₂₁、T₂₂、T₂₃₁、T₂₃₂所对应峰的峰面积; A₀ 指总水分对应的峰 面积。

由表1可以看出,随着干燥时间的延长,红外辐射干燥胡萝卜切片 T₂₁、T₂₂、T₂₃₁和 T₂₃₂均呈现总体缩

短趋势,其中 T_{231} 呈线性缩短趋势,其线性拟合回归 方程为 y = -2.2777x + 281.92, $R^2 = 0.9834$ 。可 见,红外辐射干燥时的干燥时间与 T₂₃₁有着较为显 著的线性关系,这反映了结合强度较弱的半结合水 下降趋势明显,与热风干燥前期仅脱除自由水的特 性是不同的。如图2 所示。





红外辐射干燥胡萝卜切片的横向弛豫时间 T_2 图谱如图 3 所示,其中新鲜胡萝卜切片自由水峰裂 变成 2 个峰,即 T_{231} 峰和 T_{232} 峰。这样,尽管样品有 4 个峰,但与 $T_{21}(0.01 ~ 12 \text{ ms})$ 和 $T_{22}(1 ~ 100 \text{ ms})$ 对 应的仍为结合水和结合强度较大的半结合水,而与 $T_{231}(1 ~ 811 \text{ ms})$ 对应的为结合强度较弱的半结合 水,与 $T_{232}(50 ~ 2500 \text{ ms})$ 对应的为游离在纤维组织 之间的自由水。 T_{21} 对应的水分认定为较难脱除的 结合水,该峰对应的峰面积为A₂₁;T₂₂、T₂₃₁、T₂₃₂对 应的均为较易脱除水分,与其相对应峰面积分别为 A₂₂、A₂₃₁、A₂₃₂。A₀是指总含水率对应的峰面积。



Fig. 3 T_2 spectra of carrot slices dried by infrared radiation

由图 3a 可以看出,干燥初期大量自由水蒸发外 迁的同时,与纤维组织结合强度较弱的半结合水含 量也在下降,这是因为红外线具有较强的穿透能力, 红外辐射加热实际上是对物料内部直接加热,分子 的剧烈振动加速了物料内部水分的迁移,从而大大 减小了温度梯度对水分迁移的抑制作用,提高了干 燥效率^[16-17]。由图 3b 可以看出,胡萝卜切片干燥 至 120 min 时,内部自由水已完全脱除,剩余水分均 为结合水和半结合水。

2.1.3 热风干燥胡萝卜切片 T₂ 图谱

表 2 为热风干燥胡萝卜切片的 T₂ 弛豫信息,为 简化分析,此表仅列出部分相关数据。

表 2 热风干燥胡萝卜切片的 T_2 弛豫信息(标准化处理) Tab. 2 T_2 relaxation information of carrot slices dried by hot air (standardized treatment)

试验	干燥	T_{21}/ms	$\frac{A_{21}}{A_0}$ /%	A_{21}	T_{22}/ms	A22 /0/-	Λ	T /ms	A23 /04	A ₂₃	A_0
编号	时间/min					$\overline{A_0}$ / 70	A22	1 ₂₃ / IIIs	$\overline{A_0}$ / 70		
HA – 0	0	5.337	1.366	22.383	57.224	3.086	50. 570	464.159	95.548	1 565. 769	1 638. 723
HA - 4	60	4.642	1.394	15.881	28.480	3.589	40.902	265.609	95.017	1 082. 730	1 139. 513
HA – 8	120	2.656	1.491	11.352	21.544	7.547	57.454	200. 923	90.962	692.459	761.264
HA – 12	180	1.150	1.126	5.923	12.388	9.496	49.938	200. 923	89.378	470.047	525.909
HA – 16	240	0.756	1.446	4.738	8.417	17.561	57.559	132.194	80. 993	265.465	327.762

热风干燥胡萝卜切片的横向弛豫时间 T₂ 图谱 如图 4 所示。



Fig. 4 T_2 spectra of carrot slices dried by hot air

由图 4a 可以看出,干燥初期仍呈现出与新鲜胡 萝卜相同的 3 个峰,脱除的只是游离在胡萝卜切片 纤维组织之间的自由水,受纤维组织束缚的半结合 水则变化不明显,这是由于热风干燥是从物料表面 加热、内外受热不均匀所致^[7,15],与红外辐射干燥有 着较大的区别。由图 4b 可以看出,在干燥后期(干 燥 270 min 之后)3个水分峰融合为1个峰,这是因 为干燥后期胡萝卜内部结构发生较大变化,剩余水 分主要以结合水和半结合水形式存在。

2.2 红外辐射干燥胡萝卜切片水分迁移特性

图 5 是试验 IR -4 与 IR -5 的弛豫时间对比曲 线, IR -4 的 T_{231} 和 T_{232} 分别为 132.194 ms 和 932.603 ms, IR -5 的 T_{231} 和 T_{232} 分别为 114.976 ms 和 705.480 ms, IR -5 相对于 IR -4 的横向弛豫时 间减小幅度分别为 13.02% 和 24.35%;这说明干燥 时间在 60~75 min 之间时自由水和半结合水扩散 迁移较为活跃。





由图 5 还可以看出, IR -4 有 4 个峰, 而 IR -5 的 *T*₂₂峰变得非常平坦, 几乎与 *T*₂₃₁峰发生了"融合"现象, 这是由于与纤维组织结合程度不同的半结合水之间发 生转化、H 质子自由度逐渐降低所致。另外, 在 IR -7 与 IR -8 之间也出现了类似的"融合"现象。

峰面积是指不同横向弛豫时间 T₂ 信号幅度的 累加,可定量反映某种状态水分含量的多少,图 6 是 峰面积随干燥时间变化曲线。





由图 6a 可以看出,随着干燥时间延长,峰面积 均未呈现规律性变化。在前 120 min,峰面积 A₂₁伴随着红外辐射干燥时间的延长几乎不发生变化,这 反映了结合水所占比例变化很小,脱除的只是自由 水和半结合水。峰面积 A₂₂与峰面积 A₂₃₁之和呈现 "先升后降"趋势,0~30 min 的峰面积增大是由于 胡萝卜切片自由水大幅度下降导致碳水化合物浓度 升高所致;自 30 min 干燥至 105 min 时,半结合水总 含量逐渐下降。峰面积 A₂₃₂呈现"急剧下降 - 平缓 过渡"的变化趋势,说明自由水在干燥初期急剧蒸 发,后续的"平缓过渡"现象是由于半结合水向自由 水发生转化,剩余的自由水以及由半结合水转化来 的自由水快速蒸发所致,干燥过程中同时伴随着胡 萝卜切片"收缩"和"内部坍塌"现象。

图 6b 是峰面积 A₂₁、A₂₂ + A₂₃₁和 A₂₃₂的叠加曲线,可以看出,峰面积 A₀ 随干燥时间呈指数降低,表

明胡萝卜切片含水率呈指数趋势降低。

另外,比较表1和表2可以看出,红外辐射干燥 胡萝卜切片自由水和半结合水横向弛豫时间显著大 于热风干燥,由峰面积A。变化可以得出:红外辐射 干燥胡萝卜切片的干燥速率、含水率变化梯度显著 高于热风干燥,郑霞等^[18]在哈密瓜切片干燥试验研 究中也得到类似结论。

2.3 不同干燥方式峰面积随干燥时间的衰减趋势

图 7 为红外辐射干燥与热风干燥胡萝卜切片峰 面积衰减曲线。可以看出,红外辐射干燥的峰面积 衰减速率明显快于热风干燥,这充分表明 2 种干燥 方式胡萝卜切片含水率变化规律的差异。



Fig. 7 Attenuation curves of peak area A_0 for carrot slices dried by infrared radiation and hot air

3 结论

(1)通过胡萝卜切片的横向弛豫时间 T₂ 图谱, 得知红外辐射干燥前期自由水扩散较快,同时半结 合水也有迁移发生,而热风干燥前期脱除的只有自 由水,说明 2 种干燥方式下内部水分迁移有明显区 别。

(2) 胡萝卜切片红外辐射干燥过程中自由水和 半结合水的横向弛豫时间显著大于热风干燥,红外 辐射干燥胡萝卜切片峰面积 A₀ 衰减速率显著快于 热风干燥,即干燥速率、水分变化梯度显著高于热风 干燥。

(3) 红外辐射干燥和热风干燥胡萝卜切片峰面 积 A_0 与干燥时间 t 衰减曲线拟合方程分别为:y =1 825. 2e^{-0.021x}和y =1 678. 3e^{-0.007x},充分表明2种干 燥方式下胡萝卜切片的含水率变化规律的差异。

参考文献

- 2 王相友,张海鹏,张丽丽,等. 胡萝卜切片红外干燥特性与数学模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 198-202. Wang Xiangyou, Zhang Haipeng, Zhang Lili, et al. Infrared radiation drying characteristics and mathematical model for carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 198-202. (in Chinese)
- 3 邵小龙,李云飞. 用低场核磁研究烫漂对甜玉米水分布和状态影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 302-306.

Shao Xiaolong, Li Yunfei. Effects of blanching on water distribution and water status in sweet corn investigated by using MRI and NMR[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 302 - 306. (in Chinese)

4 张绪坤,苏志伟,王学成,等. 污泥过热蒸汽与热风薄层干燥的湿分扩散系数和活化能分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 226-235.

Zhang Xukun, Su Zhiwei, Wang Xuecheng, et al. Analysis of moisture diffusion and activation energy in superheated steam and hot air sludge thin layer drying [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 226 - 235. (in Chinese)

- 5 廖文艳,王俊,于勇,等.⁶⁰Coγ辐照对胡萝卜干燥特性的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(6):123-127. Liao Wenyan,Wang Jun,Yu Yong, et al. Effect of ⁶⁰Coγ-irradiation pre-treatment on drying characters of carrot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):123-127. (in Chinese)
- 6 Xu C C, Li Y F, Yu H N. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 136, 42 47.
- 7 祝树森. 基于低场 NMR 的胡萝卜干燥过程水分状态及其分布的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- 8 Li Zhenfeng, Vijaya Raghavan G S, Wang Ning. Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying [J]. LWT—Food Science and Technology, 2010, 43(2): 291 - 297.
- 9 Hasan T. Suitable drying model for infrared drying of carrot[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(3): 610-619.
- 10 Prabal K G, Digvir S J. A magnetic resonance imaging study of wheat drying kinetics [J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 189-199.
- 11 Hwang S S, Cheng Y C, Chang C. Magnetic resonance imaging and analyses of tempering processes in rice kernels[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(1): 36-42.
- 12 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]. 农业机械学报,2015,46(4):232-237.
 Lü Weiqiao, Han Qinghua, Li Shujun, et al. Analysis of microwave drying model and water removing mechanism of ginger slices
 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):233-237. (in Chinese)
- 13 李春,张录达,任发政,等.利用低场核磁共振研究冷却条件对猪肉保水性的影响[J].农业工程学报,2012,28(23):243-249.

Li Chun, Zhang Luda, Ren Fazheng, et al. Study on different chilling factors influencing water-holding capacity of pork based on low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 243-249. (in Chinese)

- 14 张建锋,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 CSAE, 2012, 28(8): 181-185. (in Chinese)
- 15 阮榕生,林向阳,张锦胜. 核磁共振技术在食品和生物体系中的应用[M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- 16 Kathiravan K, Harpreet K K, Soojin J, et al. Infrared heating in food processing: an overview [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 2-13.
- 17 孙传祝,王相友,郭超,等. 5HY 型远红外蔬菜脱水机的研制[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 85-88. Sun Chuanzhu, Wang Xiangyou, Guo Chao, et al. Development of far infrared dryer of 5HY model for vegetables [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 85-88. (in Chinese)
- 18 郑霞,肖红伟,王丽红,等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜片的干燥时间[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 262 269. Zheng Xia, Xiao Hongwei, Wang Lihong, et al. Shorting drying time of Hami-melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 262 - 269. (in Chinese)