

远红外辐射温度对猕猴桃干燥水分迁移的影响

Effects of far-infrared radiation temperature on the moisture transfer of kiwifruit slices

曾 雅¹ 刘云宏^{1,2} 张嘉怡¹ 席慧涵¹ 胡润润¹

ZENG Ya¹ LIU Yun-hong^{1,2} ZHANG Jia-yi¹ XI Hui-han¹ HU Run-run¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 农产品干燥装备河南省工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center of Agricultural Product Drying Equipment, Luoyang, Henan 471023, China)

摘要:利用低场核磁共振技术研究不同远红外辐射温度对猕猴桃内部水分状态与迁移的影响规律。结果表明:随着辐射温度的升高,猕猴桃所需干燥时间缩短,在 120, 160, 200, 240, 280 °C 的辐射温度下平均干燥速率之比为 1.00 : 1.30 : 1.54 : 2.00 : 2.50;远红外辐射干燥猕猴桃的有效水分扩散系数为 $2.85 \times 10^{-10} \sim 7.03 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 提高辐射温度有利于增大扩散系数值;猕猴桃中存在自由水、不易流动水和结合水 3 种状态水分;随着干燥的进行,自由水的相对比例逐渐减少,辐射温度由 120 °C 升至 280 °C 时,自由水去除所需时间可缩短 75%;在干燥前期会有部分水分由高自由度向低自由度转变;干燥结束时,样品中残余水分以结合水为主;提高辐射温度可以促进各种水分状态之间的转变以及水分的去除。

关键词:猕猴桃;远红外辐射;干燥特性;低场核磁共振;水分迁移

Abstract: In order to explore the water diffusion characteristics of kiwifruit during far-infrared radiation drying, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) technology was applied to analyze the influence of radiation temperature on internal water states and moisture migration of kiwifruits during drying. The results showed that drying time decreased significantly with the increasing of radiation temperature, and the ratio of average drying rates at radiation temperatures of 120, 160, 200, 240 and 280 °C

were 1.00 : 1.30 : 1.54 : 2.00 : 2.50 respectively. The effective moisture diffusivity values was in the range of $2.85 \times 10^{-10} \sim 7.03 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, which could be improved with the increase in radiation temperature. NMR results showed that the water states in kiwifruits included free water, immobilized water and bound water. With the proceeding of drying process, the relative proportion of free water in kiwifruits decreased gradually, and the removal time of free water reduced by 75 % as radiation temperature increased from 120 to 280 °C. At the early stage of drying, some of the moisture with high degree of freedom moved to the moisture with low degree of freedom. Up to the end of drying, bound water was the main component left in the sample. And higher radiation temperature could accelerate the migration and removal of moisture.

Keywords: kiwifruit; far-infrared radiation; drying characteristics; low-field nuclear magnetic resonance; moisture migration

猕猴桃 (*Actinidia deliciosa*) 被誉为“水果之王”,含有丰富的矿物质、黄酮、多糖、维生素、多酚等对人体有益的功能性成分,具有很高的营养、医疗、保健、美容等价值^[1]。猕猴桃采后易变软腐烂,因此,研究其采后贮藏保鲜与加工技术十分重要。干燥是延长水果保存期的有效方法之一。通过干燥脱水来实现猕猴桃含水率及水分活度的降低,可抑制微生物的增长繁殖和酶的活性,防止腐败变质,同时也有利于降低其贮藏和运输成本^[2]。

远红外干燥技术是利用远红外辐射元件所发射出的远红外线被物料吸收直接转变成热能,从而使物料达到干燥状态,为目前应用较广的现代干燥技术^[3],具有热效率高、加热均匀、产品品质好等特点^[4]。Elmesery 等^[5]研究发现红外干燥得到的产品品质明显优于热风干燥所得

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:U1404334);河南省高校科技创新人才资助计划(编号:19HASTIT013);河南省科技攻关项目(编号:172102310617);国家大学生创新训练计划(编号:201810464010)

作者简介:曾雅,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:刘云宏(1975—),男,河南科技大学副教授,博士。

E-mail: bekybin@haust.edu.cn

收稿日期:2019-01-24

产品,且能实现更短的干燥时间和更低的能耗。Doymaz 等^[6]研究了不同红外功率对大枣干燥的影响,发现红外干燥有利于酚类物质的保留和抗氧化活性的提高。Saenggrayap 等^[7]关于红辣椒的干燥研究中,发现将远红外辐射辅助于微波干燥时,有效地缩短了干燥时间,且色泽、复水性较好,收缩率更低,内部组织结构破坏更小。可见,远红外辐射加热可通过改善受热和促进脱水以实现缩短时间、提高品质的目的。

低场核磁共振(LF-NMR)技术是一种有效准确的水分测量方法,通过质子弛豫行为来描述样品水分状态的变化规律,广泛应用于食品和农业领域^[8]。Wei 等^[9]利用 LF-NMR 技术对烟叶烘烤过程进行弛豫特性及质子密度成像分析,发现烘烤过程烟叶中自由水最先被干燥去除,半结合水和结合水随后才能脱除,其中少量结合水难以通过干燥脱除。Li 等^[10]利用 NMR 光谱对红外与热风干燥条件下的牛肉内部水分迁移特性进行了对比研究,发现红外干燥会导致更多的不易流动水从肌原纤维迁移为自由水。目前,利用 LF-NMR 技术探讨猕猴桃远红外辐射干燥中内部水分迁移规律的研究尚未报道。

在远红外辐射干燥中,远红外辐射温度(即辐射板表面温度)是影响干燥速率和脱水过程最主要的干燥参数,有必要对其进行深入探讨。试验拟以猕猴桃切片为远红外辐射干燥试验对象,探讨远红外辐射温度变化对猕猴桃片干燥特性的影响,通过横向弛豫时间反演谱得到不同远红外辐射干燥温度下的猕猴桃水分状态及迁移变化趋势,分析远红外辐射温度对猕猴桃干燥过程中各种水分变化的影响规律。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

猕猴桃:购于洛阳市大张超市,要求成熟度均匀、无腐烂损坏。

1.2 仪器与设备

远红外辐射干燥器:河南科技大学自制,具体结构和参数见文献^[11];

核磁共振分析仪:NMI120-015V-1 型,上海纽迈电子科技有限公司;

切片机:SHQ-1 型,德州天马机械有限公司;

电子天平:Scout SE 型,美国 OHAUS 公司。

1.3 干燥方法

新鲜猕猴桃的初始干基含水率采用 105 °C 烘箱法^[12]测得,为(655±12)%。猕猴桃洗净去皮后切成厚度为 5 mm 的圆形薄片,每组试验取大约 70 g 猕猴桃均匀平铺于物料盘上。远红外辐射干燥设备参数参照文献^[11]进行设置;开启热泵干燥机和远红外辐射装置,设定不同的远红外辐射温度(120,160,200,240,280 °C),随后将物

料放置于干燥装置中进行干燥试验。干燥过程中每隔 30 min 称重 1 次,直至连续 2 次所称质量不变时,干燥结束。为较好地探讨远红外辐射温度对干燥特性与水分迁移的影响,本试验固定其他干燥参数,如气流温度 35 °C、风速 1.5 m/s、辐射距离 10 cm。每组试验均重复 3 次。

1.4 指标测定

1.4.1 物料干基含水率和干燥速率的计算 参照文献^[13]。

1.4.2 干燥过程中物料的有效水分扩散系数 通过水分比公式和 Fick 扩散定律计算,详见文献^[14]。

1.4.3 不同组分水比例及质量的计算 参照文献^[15]。

1.5 LF-NMR 检测

根据文献^[16]的方法进行试验。

2 结果与分析

2.1 远红外辐射温度对猕猴桃干燥特性的影响

由图 1 可知,猕猴桃水分含量随着干燥的进行而持续下降,且辐射温度越高,干燥时间越短。辐射温度为 120,160,200,240,280 °C 时,猕猴桃的干燥时间分别为 600,480,390,300,240 min,平均干燥速率之比为 1.00:1.30:1.54:2.00:2.50。辐射温度升高,干燥介质与湿物料温差越大,传热推动力越大,干燥速率越快,干燥过

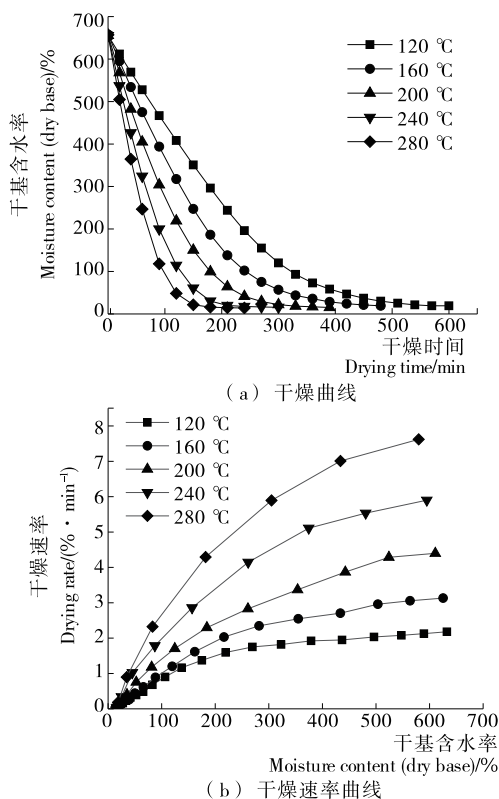


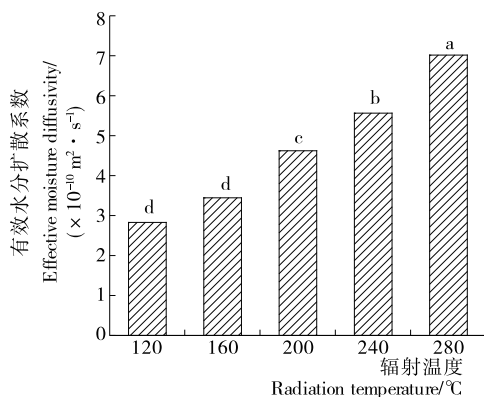
图 1 不同辐射温度下猕猴桃的干燥特性曲线
Figure 1 Drying characteristic curves of kiwifruit at different radiation temperatures

程越短;另一方面,随着辐射温度的升高,相对湿度减小,传质推动力越大,水分从物料表面扩散至干燥介质速率越大,更有利于干燥^[17]。与南瓜^[18]和铁棍山药^[19]的红外干燥过程结果类似。

水蒸气蒸发所需压力通常受干燥温度和水分含量两个因素共同制约^[5]。由图 1(b)可知,干燥速率随着辐射温度的升高而增大,且在物料含水率较高时尤其明显。当辐射温度为 280 °C 时,初期的干燥速率为 7.6%/min,后期干燥速率降至 1.0%/min 以下。在干燥初期,由于物料含水量较高,物料吸收红外能并快速转化为热能,干燥速率较高。随着水分不断被除去,猕猴桃片含湿量降低导致内部传质阻力增大,干燥速率呈下降趋势。由干燥速率曲线可知,除辐射温度 120 °C 外,其他 4 个辐射温度水平下的干燥过程均只呈降速阶段,说明猕猴桃的远红外辐射干燥过程主要由内部水分扩散控制^[20]。因此,在保证猕猴桃干燥品质的前提下,适当提高辐射温度有利于加快脱水进程、缩短干燥时间。

2.2 远红外辐射温度对有效水分扩散系数的影响

不同辐射温度下,远红外辐射干燥猕猴桃片的有效水分扩散系数如图 2 所示,干燥样品的有效水分扩散系数为 $2.85 \times 10^{-10} \sim 7.03 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。在一般脱水食品的有效水分扩散系数($10^{-11} \sim 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)范围内^[21]。辐射温度为 280 °C 时,有效水分扩散系数达到最大值,相比辐射温度 120 °C 条件下提高了 146.7%,表明提高辐射温度可以显著增大猕猴桃切片远红外干燥的有效水分扩散系数。提高辐射温度会增加提供给物料的热能,进而增强物料内部水分子活性及加快水分子迁移速率,从而提升水分扩散速率^[22]。Darvishi 等^[23]研究蘑菇的远红外干燥特性表明,在 50~90 °C 条件下,有效水分扩散系数随着干燥温度升高而增大。高鹤等^[24]研究番木瓜的中短波红外干燥,结果表明随着干燥温度从 60 °C 升高到 90 °C,



字母不同表示在 95% 的置信水平有显著差异

图 2 不同辐射温度下猕猴桃的有效水分扩散系数

Figure 2 Effective moisture diffusivity values of kiwifruit at different radiation temperatures

有效水分扩散系数从 $2.81 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 增加到 $7.29 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

2.3 远红外辐射温度对 T_2 反演谱的影响

图 3 显示了猕猴桃切片在辐射温度 120 °C 条件下弛豫谱随时间的变化。由核磁共振原理可知,横向弛豫时间越长,质子自由度越大,水分流动性更强^[9]。猕猴桃的反演谱有 3 个波峰,可以代表猕猴桃中 3 种不同的水分状态,将其分为 T_{21} (0.01~10.00 ms)、 T_{22} (10.00~100.00 ms) 和 T_{23} (>100.00 ms) 3 个区间,分别对应结合水、不易流动水以及自由水。样品中横向弛豫时间的分布特征与细胞组织的性质有着密不可分的关系。弛豫时间最短的 T_{21} ,即流动性最小的组分,代表通过氢键与蛋白质、多糖等细胞内部大分子物质紧密结合的水分。 T_{22} 代表存在于细胞质和细胞间隙中受一定束缚力约束的水,称为不易流动水。最大面积的 T_{23} 对应的是游离在纤维组织之间流动性较大的自由水,占新鲜猕猴桃组织总峰振幅的 70%。

随着干燥的进行,反演谱总峰面积不断减少,反演谱图整体向左侧偏移,说明样品中的水分含量减小,且水分不断由高自由度向低自由度转变,样品中的水与固质的结合程度增大^[25]。干燥初期,猕猴桃中的水分以自由水为主,由于自由水流动性较好,在干燥过程中最易被脱除,导致 T_{23} 不断向左移动且峰幅值迅速减小。随着干燥的进行,自由水完全脱除,猕猴桃片中剩下流动性较差的不易流动水和结合水, T_{21} 、 T_{22} 的峰幅值和横向弛豫时间也逐渐开始减小。在整个干燥过程中, T_{21} 弛豫时间变化较小,意味着结合水与大分子物质的结合十分稳定,干燥过程对其影响不明显^[26]。干燥初期,由于样品内酶和营养物质分解等因素,会使一些结合水向不易流动水转变^[9],致使结合水含量有所降低。在干燥后期, T_{22} 峰幅值逐渐下降, T_{21} 峰幅值会有所增大。由于远红外干燥造成的细胞膜损伤使猕猴桃中葡萄糖、果糖和蔗糖等碳水

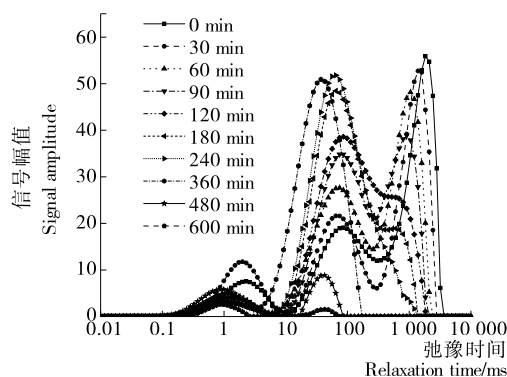


图 3 辐射温度 120 °C 下猕猴桃干燥过程中 T_2 反演谱的变化

Figure 3 T_2 relaxation spectra of kiwifruit during drying process at radiation temperature of 120 °C

化合物的浓度增加,且细胞质中某些营养成分降解,溶质的增加导致部分不易流动水迁移为结合水^[27],直至干燥结束,样品中以流动性最小的结合水为主。

远红外辐射温度为 120,160,200,240,280 ℃ 时的 T_2 图谱的变化规律相同,因此选择具有代表性的单个辐射温度进行分析。 T_2 反演谱的变化能够反映水分子的动力学特性,可间接表征出猕猴桃远红外辐射干燥过程中的水分迁移规律。

2.4 辐射温度对水分迁移变化的影响

由 T_2 反演谱得到不同状态水分的总信号强度,将其标记为 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} ,可代表结合水、不易流动水、自由水 3 种组分的相对含量,进而得到远红外干燥过程中各组分水的比例变化见图 4。

由图 4 可知,新鲜猕猴桃样品中以自由水为主,约占总水分的 70%。干燥初期,物料所吸收红外能可迅速转变为热能,物料温度随之升高,造成猕猴桃内部组织结构状况发生变化,自由水不断地从组织中脱除,12.85 g 鲜样中自由水含量由 7.70 g 一直降低为 0 g。当辐射温度从 120 ℃ 升高到 280 ℃ 时,自由水脱除时间由 480 min 降至 120 min,说明提高辐射温度能显著加快自由水的迁移与脱除。王雪媛等^[15]在苹果片中短波红外干燥的研究中同样发现,温度越高,自由水脱除所需的时间越短。由于辐射温度的升高使干燥介质产生了更多热能,提高了自由水的内能及流动性,从而加快了自由水向外迁移的速率,自由水脱除所需的时间缩短^[17]。猕猴桃在 120,160,200,240,280 ℃ 的辐射温度条件下,分别在干基含水率为 36.9%,56.6%,93.9%,100.6%,130.2% 时自由水波峰被完全除去,结合图 1 可知,干燥过程中,自由水的变化快慢会直接影响干燥速率大小。

在不同的辐射温度条件下, A_{22} 所占比例的变化趋势相同,均随干燥时间的推移先增大后减小。在辐射温度为 120 ℃ 下,猕猴桃中不易流动水的绝对质量从最初的 2.17 g,在 60 min 时增加至 2.84 g,再逐渐减少为 0.07 g。干燥进行的初期,猕猴桃内部的碳水化合物浓度升高会导致自由水向不易流动水迁移,且细胞质内营养物质及酶分解出的结合水也可能迁移为不易流动水,导致不易流动水所占比例升高^[25]。猕猴桃在 120,160,200,240,280 ℃ 的辐射温度的条件下,干燥至 90 min 时,不易流动水的比例分别占 34%,40%,43%,58%,70%。说明在较高辐射温度下,不易流动水比例的增大幅度更明显,是由于辐射温度升高,温度梯度增大使自由水去除更快,随着脱水的进行以及组织液浓度的升高,高自由度水分向低自由度水分的迁移转化速率加快^[28]。随着干燥继续进行, A_{22} 比例呈下降趋势,说明在自由水被脱除后,不易流动水开始逐渐减少,可能是一部分不易流动水向外迁移为自由水被脱除,另一小部分迁移为与猕猴桃固质结合

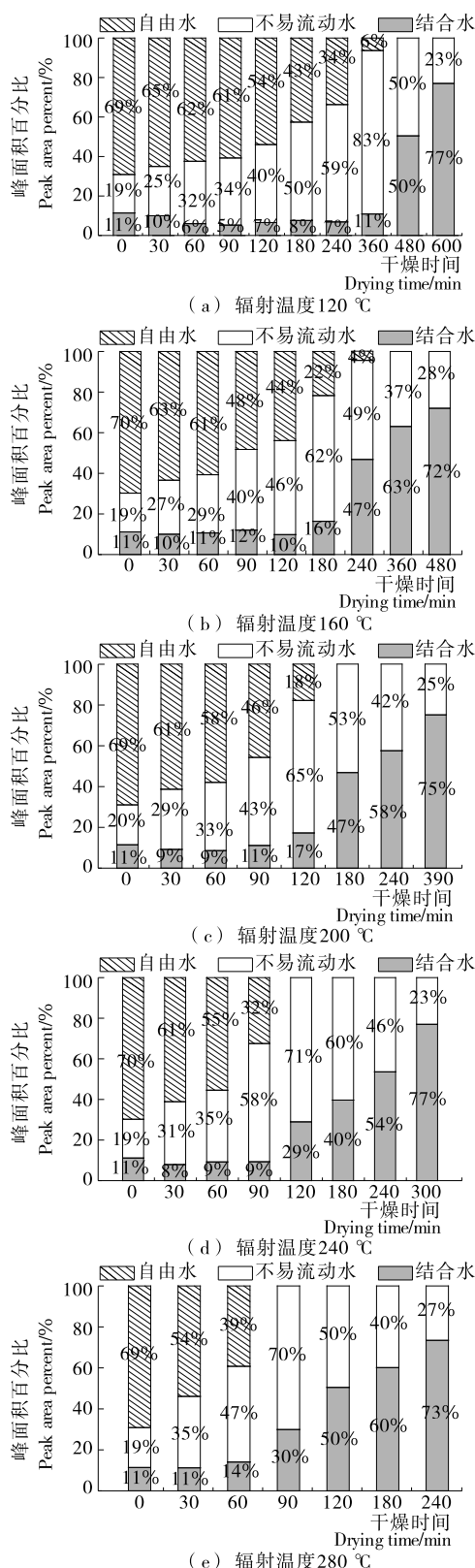


图 4 不同辐射温度下猕猴桃干燥过程中各组分水比例的变化

Figure 4 Changes in proportion of each component of water of kiwifruit at different radiation temperatures

更紧密的结合水。

结合水通过氢键与蛋白质、糖类等大分子紧密结合,一般不易被干燥去除^[29]。前 2 h 结合水可能会有所减少,是因为温度梯度的形成使得少部分流动性相对较大的结合水向不易流动水迁移。随着干燥中自由水和不易流动水不断被脱除,导致总水分含量下降,因此结合水峰比例在后期逐渐增大。

通过干燥过程中各组分水比例的变化,可以看出不同辐射温度对猕猴桃内部水分迁移的影响不同。自由水流动大,在猕猴桃样品中的相对比例从 70% 降至 0%,表现为干燥初期水分扩散快、脱水速率大的特点;此外,提高辐射温度可以通过提供更多的能量来促进自由水的蒸发扩散以及各种水分状态之间的转变过程,最终加快干燥脱水进程。与 Xu 等^[30]研究胡萝卜远红外干燥中水分变化一致。

3 结论

试验研究不同远红外辐射温度对干燥猕猴桃的水分扩散特性的影响。随着辐射温度的升高,干燥时间明显缩短,干燥速率显著提高。干燥过程的有效水分扩散系数为 $2.85 \times 10^{-10} \sim 7.03 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$,且随着辐射温度的升高而增大。

LF-NMR 结果表明,新鲜猕猴桃样品中含有大量的自由水,在干燥过程中最易被脱除,从而表现出干燥初期干燥速率大的特点;随着干燥的进行及自由水的脱除,水分由高自由度逐渐向低自由度转变,不易流动水含量增多,待不易流动水达到一定量时,又向结合水迁移;直至干燥结束,样品中以流动性最差的结合水为主。不同辐射温度对水分扩散的影响不同,提高辐射温度可以促进自由水的蒸发扩散,以及各种水分状态之间的转变过程。

运用 LF-NMR 技术能实现猕猴桃远红外干燥中水分状态变化的实时检测。因此,在保证猕猴桃干燥品质的前提下,适当提高辐射温度能促进其内部水分的蒸发与扩散,从而提高干燥速率,缩短干燥时间。试验为远红外辐射干燥中水分扩散特性及迁移规律研究提供理论参考,为更好地评价远红外辐射对猕猴桃干燥的作用,远红外辐射干燥对产品的物理特性与品质特征的影响还有待进一步研究。

参考文献

- [1] ENGSTR M B, NORDBERG G F. Polyphenol contents and in vitro antioxidant activities of lyophilised aqueous extract of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1 482-1 489.
- [2] 许森, 陈庆红, 罗轩, 等. 猕猴桃贮藏保鲜技术研究进展[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(5): 809-812.
- [3] 魏忠彩, 孙传祝, 张丽丽, 等. 红外干燥技术在果蔬和粮食加工中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(1): 217-220.
- [4] RIADH M H, AHMAD S A B, MARHABAN M H, et al. Infrared heating in food drying: an overview [J]. Drying Technology, 2015, 33(3): 322-335.
- [5] ELMESERY H S, MWITHIGA G. Performance of a convective, infrared and combined infrared-convective heated conveyor-belt dryer [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(5): 2 721-2 730.
- [6] DOYMAZ I, KARASU S, BASLAR M. Effects of infrared heating on drying kinetics, antioxidant activity, phenolic content, and color of jujube fruit [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2016, 10(2): 283-291.
- [7] SAENGRAYAP R, TANSAKUL A, MITTAL G S. Effect of far-infrared radiation assisted microwave-vacuum drying on drying characteristics and quality of red chilli [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(5): 2 610-2 621.
- [8] LI Lin-lin, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. LF-NMR online detection of water dynamics in apple cubes during microwave vacuum drying [J]. Drying Technology, 2018, 36(16): 1-10.
- [9] WEI Shuo, TIAN Bin-qiang, JIA Hong-fang, et al. Investigation on water distribution and state in tobacco leaves with stalks during curing by LF-NMR and MRI [J]. Drying Technology, 2018, 36(12): 1-8.
- [10] LI Xia, XIE Xiao-lei, ZHANG Chun-hui, et al. Role of mid-and far-infrared for improving dehydration efficiency in beef jerky drying [J]. Drying Technology, 2017, 36(3): 283-293.
- [11] 李晓芳, 刘云宏, 马丽婷, 等. 远红外辐射温度对金银花干燥特性及品质的影响 [J]. 食品科学, 2017, 38(15): 69-76.
- [12] SHI Jun-ling, PAN Zhong-li, MCHUGH T H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1 962-1 972.
- [13] COHEN J S, YANG T C S. Progress in food dehydration [J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 6(1): 20-25.
- [14] KAYRAN S, DOYMAZ I. Infrared drying and effective moisture diffusivity of apricot halves: Influence of pretreatment and infrared power [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(2): 1-8.
- [15] 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.
- [16] 刘云宏, 孙畅莹, 曾雅. 直触式超声功率对梨片超声强化热风干燥水分迁移的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 284-292.
- [17] JATURONGLUMLERT S, KIATSIRIROAT T. Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(2): 254-260.

(下转第 188 页)

- Possible involvement of programmed cell death pathways in the neuroprotective action of polyphenols[J]. *Current Alzheimer Research*, 2011, 8(5): 445-451.
- [5] 陈挺强, 刘淑敏, 黄惠华. 绿茶与红茶浸提液功能性成分含量和抗氧化能力的差异研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(10): 141-146.
- [6] KANWAR J, TASKEEN M, MOHAMMAD I, et al. Recent advances on tea polyphenols[J]. *Frontiers in Bioscience*, 2012, 4(4): 111.
- [7] DRAŽENKA K, DUNIA H, ANA B, et al. Green tea preparation and its influence on the content of bioactive compounds[J]. *Food Research International*, 2010, 43(1): 167-176.
- [8] PEREZBURILLO S, GIMENEZ R, RUFIANHENARES J A, et al. Effect of brewing time and temperature on antioxidant capacity and phenols of white tea: Relationship with sensory properties[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248(15): 111-118.
- [9] 黄秀琼, 柴硕, 黎娜, 等. 保靖黄金茶品质季节变化规律初探[J]. *茶叶通讯*, 2014, 41(2): 22-24.
- [10] 黄怀生, 粟本文, 赵熙, 等. 保靖黄金茶香气成分分析[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2011, 37(3): 271-274.
- [11] 何健, 印伟. 茶叶中茶多酚的提取工艺及其含量测定[J]. *中国药业*, 2011, 20(13): 31-32.
- [12] YIN Jun-feng, XU Yong-quan, YUAN Hai-bo, et al. Cream formation and main chemical components of green tea infusions processed from different parts of new shoots[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(2): 665-670.
- [13] FERNANDO C D, SOYSA P. Extraction kinetics of phytochemicals and antioxidant activity during black tea (*Camellia sinensis* L.) brewing [J]. *Nutrition Journal*, 2015, 14(1): 74.
- [14] 郭虹雯, 赵惠茹, 倪莉, 等. 武夷岩茶多酚组分及其抗氧化活性[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(12): 325-331.
- [15] PETRA Š, LENKA C E, MILAN M. Fast gradient HPLC/MS separation of phenolics in green tea to monitor their degradation[J]. *Food Chemistry*, 2017, 237(15): 471-480.
- [16] 王万秋, 叶扬, 张宝林, 等. 不同冲泡条件对平山雨花茶茶多酚释放含量的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 64-68.
- [17] XU Yong-quan, JI Wei-bin, YU Pei-gen, et al. Effect of extraction methods on the chemical components and taste quality of green tea extract[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248(15): 146-154.
- [18] 屈绍广, 王昶昊, 施云海, 等. 用状态方程模拟氨基酸水溶液的热力学性质[J]. *华东理工大学学报: 自然科学版*, 2015, 41(3): 281-286.
- [19] 韩延超, 陈杭君, 邵海燕, 等. 冲泡条件对西湖龙井抗氧化特性的影响及相关性分析[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(10): 134-142.
- [20] ESHITA S, ROBIN J, ASHU G. L-Theanine: An astounding sui generis integrant in tea[J]. *Food Chemistry*, 2018, 242(1): 601-610.
- (上接第 147 页)
- [18] GHABOOS S H, ARDABILI S M, KASHANINEJAD M, et al. Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53(5): 2 380-2 388.
- [19] 宋小勇. 远红外辅助热泵干燥对铁棍山药片品质影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(7): 1 337-1 343.
- [20] YAO Zhi-ming, MAGUER M L. Mathematical modelling and simulation of mass transfer in osmotic dehydration processes[J]. *Nursing Clinics of North America*, 1997, 8(4): 575-586.
- [21] 杨爱金, 刘璇, 毕金峰, 等. 食品干燥过程中水分扩散特性的研究进展[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 247-250.
- [22] SANJU N N, LOZANO M, GARC A-PASCUAL P, et al. Dehydration kinetics of red pepper (*Capsicum annuum* L var Jaranda)[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2003, 83(7): 697-701.
- [23] DARVISHI H, NAJAFI G, HOSAINPOUR A, et al. Far-infrared drying characteristics of mushroom slices [J]. *Chemical Product & Process Modeling*, 2013, 8(2): 107-117.
- [24] 高鹤, 易建勇, 毕金峰, 等. 番木瓜中短波红外干燥特性[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 30-35.
- [25] 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): 53-59.
- [26] XU Fang-fang, JIN Xin, ZHANG Lu, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods[J]. *Food Research International*, 2017, 96: 191-197.
- [27] LV Wei-qiao, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Smart NMR method of measurement of moisture content of vegetables during microwave vacuum drying[J]. *Food & Bio-process Technology*, 2017, 10(12): 2 251-2 260.
- [28] KRISHNAMURTHY K, KHURANA H K, SOOJIN J, et al. Infrared heating in food processing: An overview[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety*, 2010, 7(1): 2-13.
- [29] 李娜, 李瑜. 利用低场核磁共振技术分析冬瓜真空干燥过程中的内部水分变化[J]. *食品科学*, 2016, 37(23): 84-88.
- [30] XU Cong-cong, LI Yun-fei, YU Hua-ning. Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 136(6): 42-47.