

不同干燥方式下带壳鲜花生质构、营养成分及能耗的表征

朱凯阳¹, 任广跃^{1,2*}, 段 续^{1,2}, 李琳琳^{1,2}, 赵路洁¹, 刘盼盼¹

(¹ 河南科技大学食品与生物工程学院 河南洛阳 471000

² 粮食储藏安全河南省协同创新中心 郑州 450001)

摘要 采用热风、红外、红外-热风 and 红外-喷动干燥技术对带壳鲜花生进行干燥处理,研究干燥过程中花生壳结构、花生仁营养成分及能耗的变化。结果表明:带壳鲜花生在红外-喷动干燥方式下,脱水速率更高,能耗显著降低,与热风、红外和红外-热风相比,脱水时间分别缩短了 40%,33%,14%,能耗分别减少了 66%,32%,16%。随着干燥时间的延长,花生壳与花生仁的网状结构变形明显,孔隙率增大,且在红外-喷动方式下获得最大值。4 种干燥方式下,花生壳硬度均表现为先减小后增大,而花生仁硬度呈先增后减再增的趋势;在红外-喷动干燥方式下,氨基酸和脂肪酸持有量衰退不明显,与未经干燥处理的带壳鲜花生相比,氨基酸、脂肪酸衰退率分别为 3.83%,4.07%。而热风、红外、红外-热风干燥方式下氨基酸、脂肪酸衰退率分别为 9.53%,7.77%;9.06%,9.27%和 5.83%,4.97%。试验表明采用红外-喷动干燥方式明显优于其它 3 种干燥方式,为红外-喷动技术用于其它带壳类物料的干燥提供了理论支持。

关键词 干燥;带壳鲜花生;硬度;氨基酸;脂肪酸;能耗

文章编号 1009-7848(2022)04-0177-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.04.017

花生(*Arachis hypogaea* L.),蔷薇目豆科 1 年生草本植物,其中油脂和蛋白质含量最为丰富,同时还含有各种维生素以及钙、磷、铁等微量元素,具有极高的营养价值^[1]。花生是我国重要的油料作物和经济作物^[2],2020 年我国花生产量达 1 799.27 万 t^[3]。然而,花生的收获季节多在夏季高温多雨时,采摘后新鲜的花生含水量高,不易贮存,若不进行干燥处理,容易使花生再次生芽或者发霉腐败^[4-6],影响食用。干燥处理可以延长花生的贮存期,更易于运输及加工处理。

自然晾晒是最传统也是最常用的一种方法,而该法受限制较大。相较于传统的自然晾晒法,花生现多用机械化干燥方式。目前,最常见的花生干燥是热风干燥^[7]和热泵干燥^[8],然而,这两种处理方式会造成带壳花生内部的水分难以向外扩散,干燥时间过长,不利于节约能源。相较于热风和热泵干燥,越来越多的学者提出采用联合干燥方式来解决上述问题。红外-喷动联合干燥技术是以远红外干燥、喷动干燥为基础的组合干燥技术,远红外

辐射具有热效应好、节能等优点^[9-10],喷动床可使物料在床体内做喷泉式往复运动,实现物料与热空气在床层内有规律的间歇接触。段续等^[11]采用红外喷动床对玫瑰花瓣进行干燥试验,研究不同出风温度和风速下玫瑰花瓣的干燥特性并建立干燥动力学模型,为红外-喷动干燥的研究与应用提供参考。

近年来,联合干燥技术在农产品加工领域的应用越来越广,然而,关于红外喷动床的研究较少。本试验以新鲜带壳花生为研究对象,利用扫描电子显微镜和质构仪等设备系统研究热风、红外、红外-热风 and 红外-喷动 4 种干燥方式对带壳鲜花生的质构、营养成分及能耗的影响,以期为带壳鲜花生收获后的贮藏、加工等提供数据参考,为带壳鲜花生的机械化干燥提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜带壳花生,海花一号,产自河南省郑州市。

正己烷,江苏强盛功能化学股份有限公司,在孔隙率测定试验中使用。

1.2 仪器与设备

本试验用到的红外-喷动干燥设备示意图如

收稿日期:2021-04-15

基金项目:河南省高校重点科研项目(20A550006);国家自然科学基金面上项目(31671907)

作者简介:朱凯阳(1994—),男,硕士生

通信作者:任广跃 E-mail: guangyueyao@163.com

图1所示。红外-喷动干燥机由变频控制轴流风机、干燥室和4个陶瓷红外加热器,以统一的角度安装在圆筒的中间内壁。然后可以通过红外辐射加热喷泉区域中的样品。干燥室由顶部的圆柱体(直径和高度分别为550 mm和1 500 mm)和底部的圆锥体(直径和高度分别为550 mm和450 mm)组成。出口温度由Pt100温度传感器检测。入口气流速度由风速传感器检测。在干燥过程中,使用绝干青豆作为惰性材料助流剂以增加喷动床干燥器中物料的流动性。

其它仪器与设备:A.2003N型电子天平,上海佑科仪器仪表有限公司;TM3030plus SEM,日本日立高新技术公司;TA.XT Express 食品物性分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;D-110 型色差仪,爱色丽色彩技术有限公司;TSQ 9000 型气相色谱-质谱联用仪,美国赛默飞世尔科技公司;A300 型氨基酸全自动分析仪,德国 MembraPure 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验处理 原料预处理:试验开始前,挑选大小均匀颗粒饱满的花生,清除泥沙并放置于网筛中30 min,用自封袋封装并放置于4℃冰箱中保存备用。根据《食品安全国家标准食品中水分的测定》(GB 5009.3-2016)测得本试验带壳鲜花生的初始干基含水率为1.163 g/g。

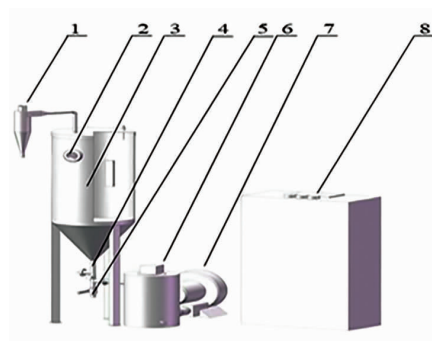
1) 红外-喷动干燥试验 将封存于冰箱中的带壳鲜花生取出,恢复至室温,取1 kg花生放入红外-喷动床中,同时加入2 kg辅料青豆,使花生可以获得更好的喷动效果。喷动床进口风速通过调节变频器的频率改变,设置变频器的频率为28.6 Hz,出风温度70℃。将花生放入,每隔30 min从喷动床中选取做好标记的20粒花生快速称量后放回,得到的数据记录留用。待花生干燥至安全水分(干基含水率不大于0.1 g/g)时停止试验。

带壳鲜花生的干基含水率(X , g/g)按式(1)^[12]计算。

$$X = \frac{m_t - m}{m} \quad (1)$$

式中, m_t —— t 时刻物料的质量,g; m ——物料绝干(质量不再变化)时的质量,g。

干燥过程中的干燥速率 $[U, g/(g \cdot h)]$ 按式



注:1.旋风分离器;2.观察窗;3.干燥容器;4.温度传感器;5.出料孔;6.预热罐;7.轴流风机;8.控制系统。

图1 红外-喷动干燥设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of infrared-spray drying equipment

(2)^[13]计算。

$$U = \frac{X_t - X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中, X_t —— t 时刻干基水分含量,g/g;
 $X_{t+\Delta t}$ —— $t+\Delta t$ 时刻干基水分含量,g/g。

2) 红外干燥试验 采用实验室自制的红外辐射干燥设备。将封存于冰箱中的带壳鲜花生取出,恢复至室温,取500 g花生放到载物盘上,远红外辐射干燥箱参数设定参照刘云宏等^[14]进行修改,辐射距离10 cm,辐射板温度70℃。每隔30 min从干燥箱中取样,快速测量质量后放回,得到的数据记录留用。

3) 红外-热风干燥试验 采用实验室自制的红外-喷动设备,调整风速。并用网格制作支架,取500 g花生平铺于网状托盘上,设定风速为1 m/s,温度为70℃。每隔30 min从设备中取出,快速称量后放回,记录数据留用。

4) 热风干燥试验 将带壳鲜花生恢复至室温,取500 g铺于带网孔托盘(25 cm×25 cm,筛孔直径为0.5 cm)内,设定电热鼓风干燥箱风速为1 m/s,温度为70℃。每隔30 min从干燥箱中取出,快速称量后放回,记录数据留用,以上每组试验均重复3次。

1.3.2 SEM观察微观结构 采用SEM对干燥过程中的花生仁和花生壳进行观察,放大倍数为200倍。

1.3.3 硬度的测定 参考臧容宇^[15]的方法,并稍

作修改。

1.3.4 孔隙率的测定 参考卢映洁等^[16]的方法,并稍作修改。

1.3.5 脂肪酸的测定 参考魏晋梅等^[17]的方法,并稍作修改。

1.3.6 氨基酸的测定 参考王馨雨等^[18]的方法,并稍作修改。

1.3.7 试验过程中能耗的测定 参考消耗的电量来表示。

1.4 数据处理与分析

本试验数据采用 Excel 软件进行处理,采用 Origin8.5 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 带壳鲜花生在不同干燥方式下的干燥特性

按照 1.3.1 节的方法,分别考查带壳鲜花生在热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥下的干燥特性。结果如图 2、图 3 所示。

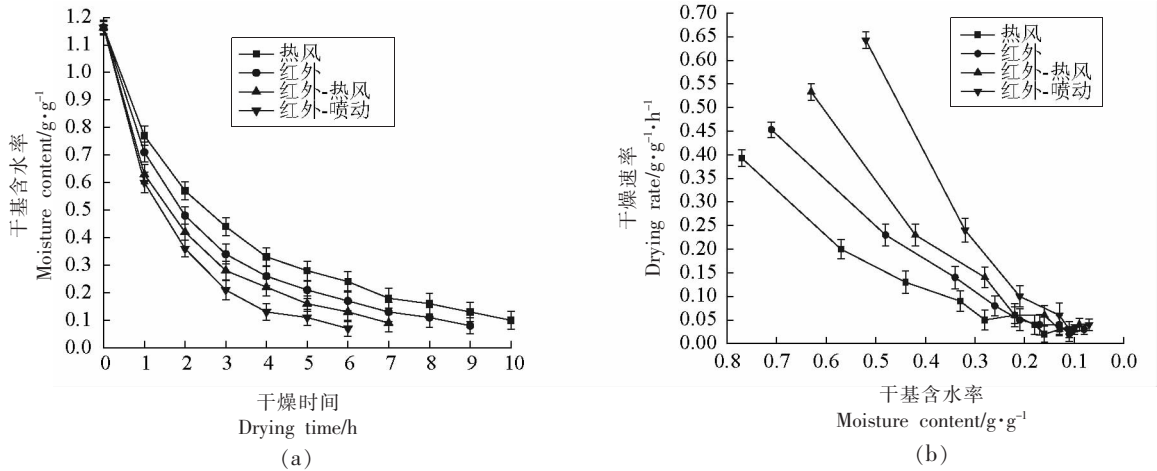


图 2 带壳鲜花生在不同干燥方式下的干燥曲线(a)及干燥速率曲线(b)

Fig.2 Drying curve (a) and drying rate curve (b) of fresh in shell peanuts under four drying methods

从图 2a 可知,带壳鲜花生的干基含水量随着干燥时间的延长不断减小。在热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥的处理下,干燥到花生的安全水分含量(干基含水率为 0.1 g/g)以内,所需的时间分别为 10,9,7,6 h,与热风、红外和红外-热风相比,脱水时间分别缩短了 40%, 33%, 14%。随着干燥方法的改变,干燥曲线逐渐变陡,红外-喷动干燥明显陡于另外 3 种干燥方法,一方面,花生的初始含水量较高,干燥初期水分含量变化比较明显;另一方面,在带壳鲜花生中,花生仁的含水率远大于花生壳的含水率,形成内高外低的含水率梯度,在温度梯度和含水率梯度的共同作用下促使花生失水。在红外-喷动干燥中,喷动床系统能够在物料颗粒进行干燥的过程中,提供气动搅拌,这种搅拌不仅通过在颗粒表面重建边界层来促进传质和传热,而且通过缩短干燥时间来提高整个系统的能量利用率,此外,它还可以通过热气和固体颗粒之间的紧密接触来提高产

品的均匀性和质量。从图 3 可以看出,红外-喷动干燥带壳花生受热更加均匀,从而可以进一步加速水分的迁移。从图 2b 可以看出,随着干燥方法的改变,干燥速率在不断变大。在干燥过程中还具有明显的降速阶段,说明在带壳鲜花生的干燥过程中,水分扩散是由内部扩散控制的,而内部扩散阻力决定了传质过程的速率。干燥初期,干燥速率下降趋势明显,表明在干燥方法的影响下,带壳鲜花生的水分快速脱去,此时,干燥方法是影响干燥速率的主要因素;进入干燥后期,干燥速率逐渐变的缓慢,一方面,随着干燥时间的延长,带壳鲜花生的水分含量逐渐降低,花生内外温度相对稳定,导致干燥过程变得缓慢;另一方面,水分迁移还受到物料自身体积、孔隙变化等多方面的影响,而带壳鲜花生由壳与仁两部分组成,随着干燥时间的延长,花生仁与花生壳之间的空隙变大,形成空气隔层,对花生仁的传质和传热形成阻碍^[19-20],阻止水分的散失,不利于干燥的进行。

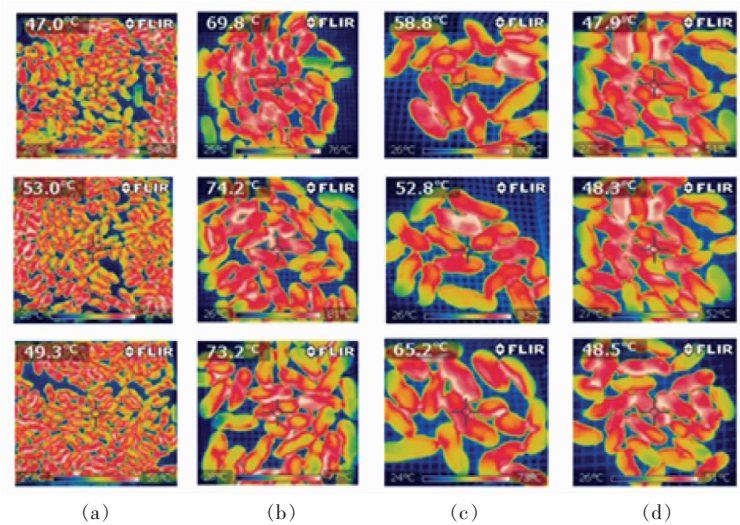


图3 热风干燥(a)、红外干燥(b)、红外-热风干燥(c)和红外-喷动干燥(d)过程中热成像图
Fig.3 Thermography during hot air drying (a), infrared drying (b), infrared hot air drying (c)
and infrared hot air spouted bed drying (d)

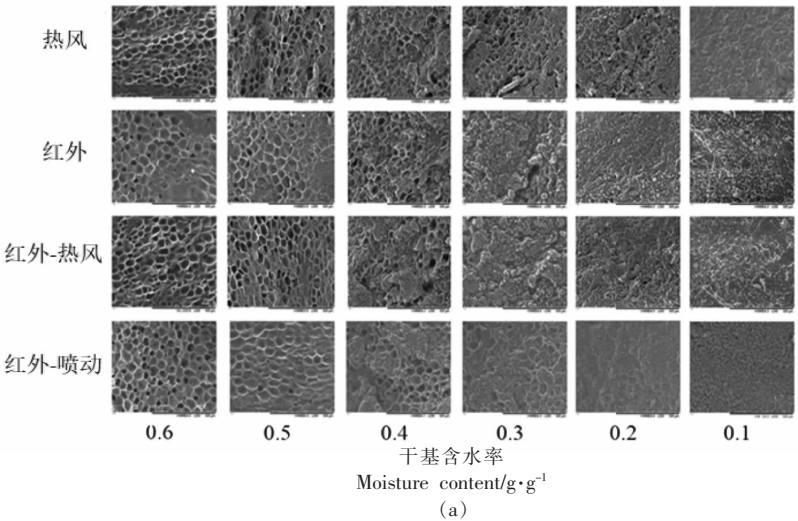
2.2 干燥方式对带壳鲜花生微观结构的影响

按照 1.3.2 节的方法,分别考查带壳鲜花生在热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥下的微观结构,结果如图 4 所示。

从图 4a 可以看出,在干燥初期,花生仁的细胞结构完整,孔径较大,细胞边界清晰,规则排列。随着干燥时间的延长,花生仁的细胞孔径逐渐减小,花生仁的结构更加紧密。当干基含水率为 0.4 g/g 时,花生仁的网状结构开始出现变形,且表面出现凹凸不平的颗粒状结构;进入干燥后期,花生仁的网状结构变形严重,颗粒状结构越发突出。结合干燥曲线图 2a 分析可知,花生仁细胞结构的变

化与水分含量密切相关,并实时影响着花生仁的干燥进程,由于干燥过程中花生仁的组织结构不断收缩,网状细胞结构逐渐发生形变,增加水分扩散阻力,不利于水分散失。在干基含水率为 0.3 g/g 时,红外和红外-热风干燥下的花生仁网状结构已全部变形,进一步验证了红外干燥是从物料内部到外部,而红外-喷动干燥下花生仁的网状结构还存在,说明红外-喷动可以克服红外干燥的缺点,提高干燥的均匀性。

由图 4b 可知,在干基含水率为 0.6 g/g 时,花生壳的结构松散,随着干燥时间的延长,花生壳的结构逐渐收缩,微观结构越发致密,从而导致花生



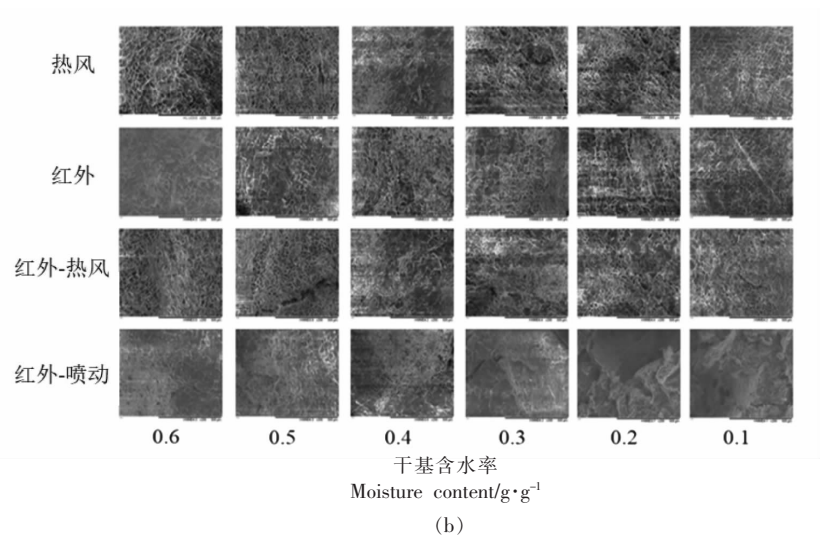


图 4 4 种干燥方式过程中花生仁(a)与花生壳(b)的 SEM 图(×200)

Fig.4 SEM pictures of peanut kernels (a) and shells (b) during four drying methods (×200)

仁的水分不易扩散,影响干燥效率。对比不同干燥方式下相同干基水分含量的花生壳结构,发现红外-喷动使得花生壳在干燥后期产生肉眼可见的孔隙,结合图 2b 和图 6b 可以看出,由于红外-喷动在干燥后期使花生壳产生孔隙,不仅提高了带壳花生的干燥速率,还增加了带壳花生的孔隙率。这可能是因为花生壳本身对花生仁就有一定的保护作用,带壳花生进行干燥,花生仁的失水速率显著大于壳的失水速率,壳与仁产生一层空隙,该空

隙可以起到保温层的作用,阻止了水分的迁移。然而,红外-喷动干燥下花生壳产生的孔隙起到桥梁的作用,破坏了该空隙的完整性,可间接认为花生仁直接与外界接触,因此红外-喷动对带壳鲜花生干燥速率的提升有显著作用。

2.3 干燥方式对带壳鲜花生硬度的影响

按照 1.3.3 节的方法,分别考查带壳鲜花生在热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥下的硬度值,结果如图 5 所示。

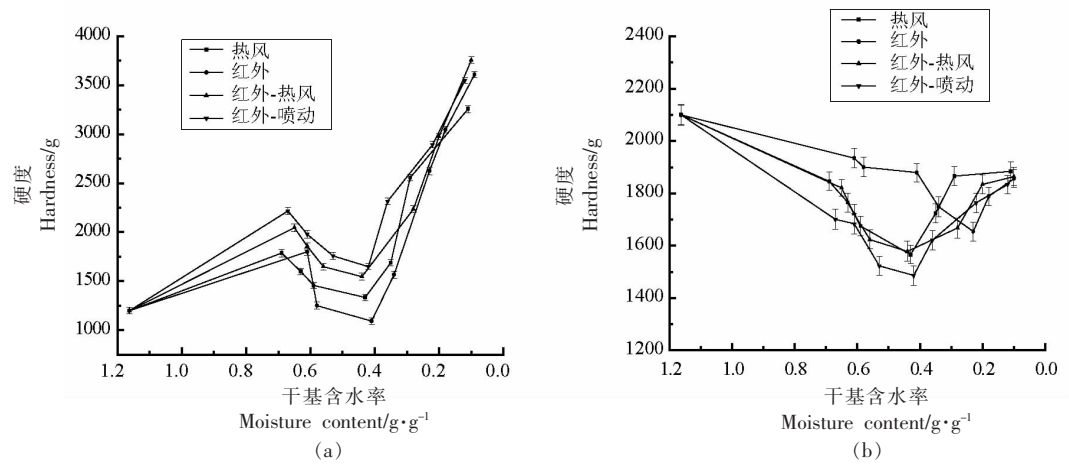


图 5 4 种干燥方式过程中花生仁(a)与花生壳(b)的硬度变化

Fig.5 Hardness changes of peanut kernels (a) and shells (b) during four drying methods

由图 5a 可以看出,带壳鲜花生在不同干燥方式过程中花生仁的硬度随着干基水分含量的降低

呈增大-减小-增大的趋势,红外-喷动干燥处理的花生仁硬度明显大于其它干燥方式处理的花生

仁,由图 2b 可知,在干燥开始阶段,红外-喷动条件下带壳鲜花生的干燥速率最大,失水最快,因此,硬度变化最快。随着干燥的进行,在干燥初期,花生仁的孔径虽然变小,但水分扩散良好,花生仁的水分含量减少,硬度增大。在干燥中期,花生仁网状结构变形,水分扩散通道被阻挡,同时,花生壳还具有一定的保护作用,使花生内部形成一个高温潮湿的环境,花生仁在该环境中开始变软,硬度降低,韧性增加。在硬度降低阶段,单一红外加热方式下,花生仁的硬度降低幅度最大,这可能是由于红外加热以辐射方式传递热量,当红外辐射线到达物料表面时,会穿透表面进入物料 1~3 mm^[21-22],辐射能转化为热能,使物料内部受热温度提高,加快花生仁水分向外部迁移,然而由于花生壳的保护作用,阻止了花生仁表面水分向外扩散,造成此时韧性增大,硬度陡然减小。随着干燥时间的延长,持续的高温环境使花生周围的湿度越来越小,花生仁的硬度又逐渐上升,直到干燥终点。

由图 5b 可以看出,在带壳鲜花生的干燥过程

中,花生壳的硬度先降低后升高,且鲜花生壳的硬度最大。可能是因为鲜花生壳水分含量较高,干燥使得水分减少,韧性增加,所以硬度减小。干燥初期,红外-喷动干燥的花生壳硬度的减小值最大,红外干燥的花生壳硬度减小最小。在干燥后期,花生壳的密度增大,硬度又逐渐增大。在干燥终点时,红外-喷动花生壳硬度最小,这可能是由于只有在红外-喷动中,花生处于一个动态的过程,在喷动中,花生壳由高处跌落,壳壁撞击床体,产生孔隙,由图 4b 可以看出,此时花生壳产生大量孔隙,使得此时花生壳硬度小于其它干燥方式下的花生壳。在干燥到达终点时,4 种干燥方式下花生壳硬度差别不大。然而花生仁的硬度差别较为明显,这也从侧面反映出花生壳在干燥后期几乎接近绝干,失水主要来自花生仁。

2.4 干燥方式对带壳花生孔隙率的影响

按照 1.3.4 节的方法,分别考查带壳鲜花生在热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥下的孔隙率值,结果如图 6 所示。

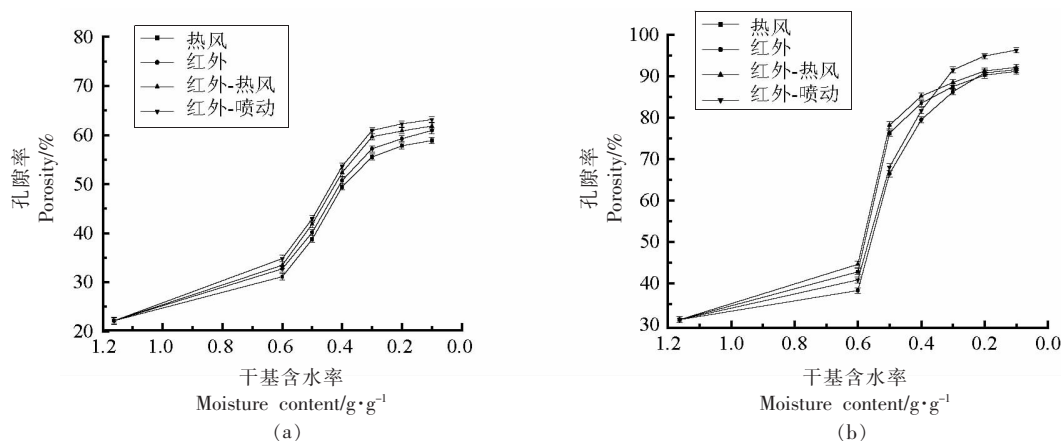


图 6 4 种干燥方式过程中花生仁(a)与花生壳(b)的孔隙率变化

Fig.6 Porosity changes of peanut kernels (a) and shells (b) during four drying methods

从图 6a 可以看出,在热风、红外、红外-热风和红外-喷动干燥中,在干基含水率为 0.1 g/g 的条件下,花生仁的孔隙率分别为 58.89%,60.94%,61.85%,63.17%。花生仁的孔隙率随着干基水分含量的降低而增加。红外-喷动干燥后的花生仁孔隙率最大,热风最小,这可能是由于在热风条件下,物料受到的热量是由外到内的,并且物料处于一种静态的干燥过程;而在红外-喷动条件下,由于红外辐射加热的特点,物料受到的热量是由内到

外的,且物料处于一种上下翻滚状态,壳和仁相互撞击摩擦,产生一定的内能,使得花生仁的孔隙率增大。在干燥过程中,带壳鲜花生的水分逐渐散失,水分的散失使得花生仁的细胞进入脱水状态,结合图 4a 分析可知,花生仁网状结构变形,孔隙增多,以致孔隙率持续上升,而呈现出先快后慢的趋势。在干燥初期,热风条件下花生仁的孔隙率变化缓慢,较其它条件下孔隙率变化小,这也证明了初期热风干燥主要的对象是花生壳,而其它方式

干燥对象是花生仁;随着干燥时间的延长,花生仁孔隙率曲线变陡,说明在干燥中期,花生仁开始大量失水,孔隙率变化较快;干燥后期,孔隙率曲线趋于平稳,变化幅度减小,说明干燥后期花生仁干基含水率对孔隙率的影响逐渐减小。

由图 6b 可知,在热风、红外、红外-热风 and 红外-喷动干燥中,在干基含水率为 0.1 g/g 的条件下,花生壳的孔隙率分别为 91.15%,93.28%,93.48%,96.29%。随着干燥时间的延长,花生壳的孔隙率逐渐增大,且红外-喷动干燥后的花生壳孔隙率最大。这可能是因为,在红外-喷动中,由于喷动床的特性,使得带壳花生在床体内进行喷泉式的往复运动,致使花生壳在干基含水率在 0.3 g/g 时开始出现肉眼可见的孔隙,大大增加了此时花生壳的孔隙率;进入干燥中期,花生壳孔隙率随着干基水分含量的变化快速增加,说明花生壳处于常规收缩阶段^[23],失去的水分体积等于收缩体积。随着时间的推移,花生壳内部孔隙网状结构变得密致,花生壳的孔隙率逐渐增大,然而此时疏水通路变窄,使得水分迁移受阻,导致干燥速率下降。在干燥后期,热风干燥、红外干燥和红外-热风干燥花生壳的孔隙率变化缓慢;红外-喷动干燥中,

花生壳的孔隙率还在变化,结合图 4b 可知,此时孔隙率变化的主要原因是花生壳上产生肉眼可见的孔隙,随着时间的推移,花生壳上孔隙越来越多,致使花生壳孔隙率持续变化。花生壳较高的孔隙率对干燥后带壳鲜花生的短期贮藏起到积极的作用,当水分含量在 0.1 g/g 以下时,物料含水率的升高对脂肪的氧化具有抑制作用,因为此时物料中几乎不含有水分,各组分之间处于相对平衡状态,当往该状态下的物料中加入水分时,脂肪的氧化作用会受到干扰,水分子与氢过氧化物结合,妨碍过氧化物的分解,阻止脂肪氧化进程。同时,在该干基含水率下,对非酶褐变也有很好的抑制作用。当带壳花生贮藏时会不可避免的从环境中吸收水分,红外-喷动床干燥下的带壳鲜花生有着较高的孔隙率,花生壳的保护作用减弱,进而在该含水率下短期贮藏的带壳花生有着较高的孔隙率更适合。

2.5 干燥方式对带壳鲜花生中脂肪酸的影响

按照 1.3.5 节的方法,分别考查带壳鲜花生在热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥下的脂肪酸值,结果如图 7、图 8 所示。

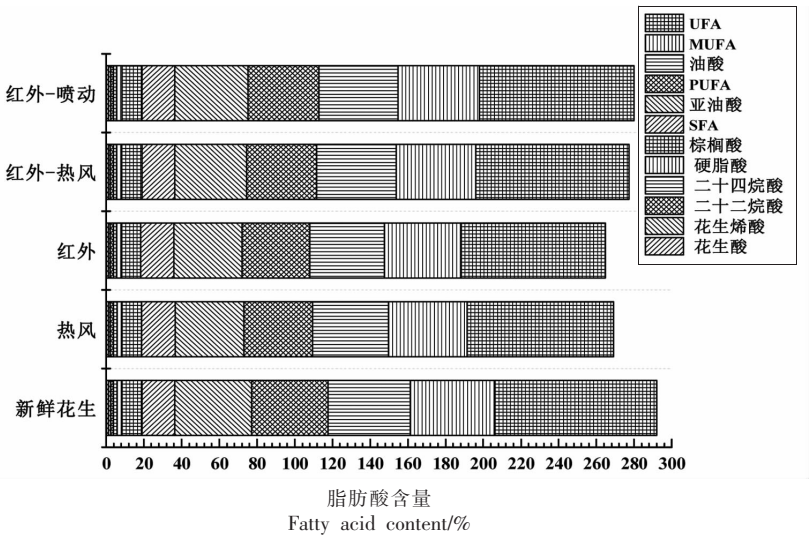


图 7 4 种干燥方式过程中带壳鲜花生的脂肪酸变化

Fig.7 Fatty acid changes of fresh peanut with shell during four drying methods

脂肪酸含量和组成是评价花生仁营养品质和加工特性的重要指标,尤其是花生中的不饱和脂肪酸(以油酸和亚油酸为主)。试验中增加新鲜花

生的脂肪酸含量指标用来对比不同干燥方式对花生品质的影响。由图 7 可知,经热风、红外、红外-热风、红外-喷动干燥处理后,脂肪酸总量衰退率

分别为7.77%,9.27%,4.97%,4.07%,新鲜花生中不饱和脂肪酸占总脂肪酸^[24]比例超过81%,干燥后花生的不饱和脂肪酸含量显著低于新鲜花生,饱和脂肪酸(SFA)含量无显著变化($P>0.05$),不饱和脂肪酸(UFA)含量都有所降低。在干燥过程中,风速、辐射距离、氧气值和含水量等条件变化都会引起花生仁中的脂肪酸发生不同程度的化学反应,尤其是不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA),其稳定性要远远低于饱和脂肪酸,非常容易发生氧化反应而损失^[25]。

由图7可知,4种干燥方式处理后得到的花生仁中主要脂肪酸的相对含量从高到低分别是油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、二十二烷酸、花生酸、二十四烷酸、花生烯酸。从不饱和脂肪酸所占面积来看,与新鲜花生仁相比,4种干燥方式下花生仁单不饱和脂肪酸(MUFA)和多不饱和脂肪酸(PUFA)都存在明显下降($P<0.05$),其中多不饱和脂肪酸含量的下降更为显著,这可能是因为多不饱和脂肪酸中含有更多的碳碳双键,其更容易发生氧化反应而损失。将不同干燥方式下的花生仁对比,红外-喷动花生仁的不饱和脂肪酸含量相对较高,红外花生仁不饱和脂肪酸含量最低。红外加热从花生内部加热,在干燥前期使物料快速升温预热而节约干燥时间,然而单一的红外干燥还存在排湿较慢等问题,高温高湿环境使得不饱和脂肪酸更容易被氧化^[26];而红外-喷动干燥综合了红外使带壳花生内部快速集聚热量和喷动床干燥均匀性好的优势,缩短了物料的干燥时间,减少了干燥过程中对脂肪酸的破坏,故红外-喷动不仅干燥时间短,而且不饱和脂肪酸保存的含量最多。

为进一步对比经过干燥后花生仁营养价值的保留量,引入PUFA:SFA比值^[27],该比值是评价油脂营养价值的重要指标,2019年,我国医学名词审定委员会认为该值不得小于1。由图8可知,新鲜花生和干燥后花生的PUFA:SFA值都远大于推荐值,然而干燥后花生的PUFA:SFA值显著小于新鲜花生($P<0.05$),可能由于干燥过程中PUFA降低,在一定程度上降低了花生油的营养价值。而红外-喷动中花生仁的PUFA:SFA值显著高于其它干燥方式下的花生仁($P<0.05$),说明在4种干燥方式中,红外-喷动干燥的花生仁油脂的营养价

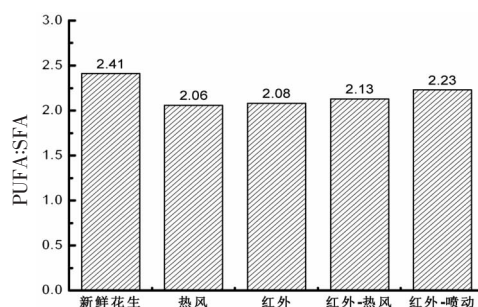


图8 4种干燥方式下PUFA:SFA比值

Fig.8 PUFA:SFA ratio under four drying methods

值相对较好。

2.6 干燥方式对带壳鲜花生中氨基酸的影响

按照1.3.6节的方法,分别考查带壳鲜花生在热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥下的氨基酸值,结果如图9所示。

由图9可以看出,花生仁中含量较多的氨基酸主要是谷氨酸、精氨酸、天冬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、甘氨酸、缬氨酸。相比于鲜花生,经热风、红外、红外-热风、红外-喷动干燥处理后,氨基酸总量衰退率分别为9.53%,9.06%,5.83%,3.83%,经干燥处理后花生的氨基酸总含量分别有所降低($P<0.05$)。干燥后花生的赖氨酸、组氨酸、谷氨酸、丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、酪氨酸含量明显低于新鲜花生($P<0.05$)。从必需氨基酸总量来看,干燥后花生的必需氨基酸含量也明显下降($P<0.05$),可能是因为这些氨基酸在干燥过程发生了氧化反应或者是与还原糖发生了美拉德反应^[28-29]而造成一定的损失。4种方式干燥的花生仁的氨基酸总量和必需氨基酸含量都存在显著差异($P<0.05$),其中红外-喷动花生氨基酸总量和必需氨基酸含量最高,红外花生和热风花生较低,且其差异不显著。由于红外加热属于电磁波应用中的一种,有文献研究表明红外对物料的作用除了升高温度造成的热效应以外,还存在着对生物细胞的非热效应,具体的作用机制尚待更深层的研究^[30]。红外-喷动联合干燥的干燥时间最短,且干燥温度较为均匀,避免了局部过热的情况,故其蛋白和氨基酸受干燥条件的影响较小,氨基酸组成和含量更接近新鲜花生。

2.7 干燥方式对能耗的影响

按照1.3.7节的方法,分别考查带壳鲜花生在

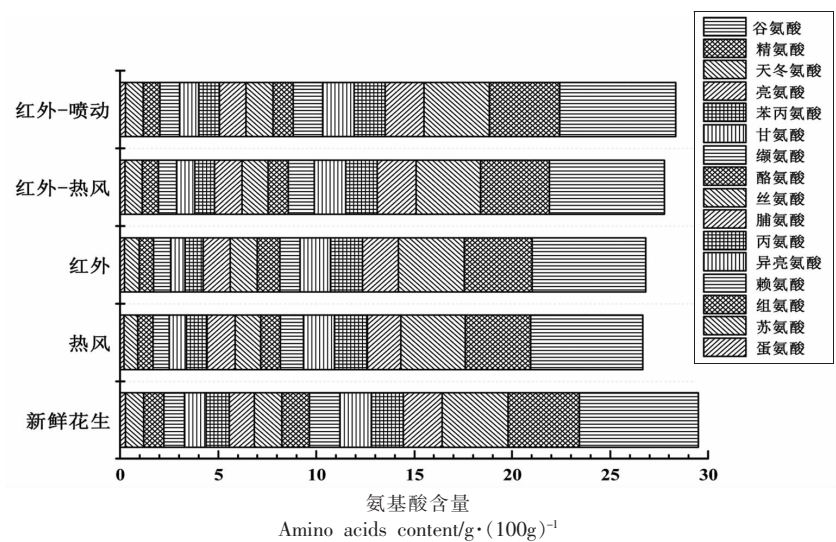


图 9 4 种干燥方式过程中带壳鲜花生的氨基酸变化

Fig.9 Amino acid changes of fresh peanut with shell during four drying methods

热风干燥、红外干燥、红外-热风干燥和红外-喷动干燥下的用电量,结果如图 10 所示。

随着社会的发展,能源缺乏问题愈发严重,如何消耗更少的能源来达到预期干燥效果是干燥的研究方向之一。由图 10 可知,在本试验中,4 种干燥方式能耗的消耗量以消耗的电量来表示。热风干燥使用普通电热鼓风干燥箱,功率 4 kw·h,由图 2a 可以看出干燥过程用时 10 h,此时消耗的电量为 40 kw·h;同等条件下,单一红外干燥消耗用电量 19.9 kw·h,红外-热风联合干燥消耗用电量 16.1 kw·h;红外-喷动干燥设备的能耗量主要来自于轴流风机和红外加热系统,在干燥过程中,其消耗的用电量为 13.5 kw·h。对比 4 种方式下的耗电量,使用红外-喷动相比于热风、红外、红外-热风减少 66%,32%,16%。说明红外-喷动相比于其它干燥方式可以缩短干燥时间,减少能耗。

3 结论

带壳鲜花生在 4 种干燥方式下,干基含水量逐渐降低,干燥速率随干燥方式的改变逐渐增大,其中红外-喷动干燥的干燥时间最短,干燥速率最大。通过微观结构观察,干燥使花生壳和花生仁的结构变形,且孔隙率增加,并最终趋于稳定,而红外-喷动干燥在到达干燥终点时花生壳孔隙率仍在增加,这可能与红外-喷动干燥中使花生壳产生孔隙有关。通过穿刺试验可知,花生仁的硬度呈先

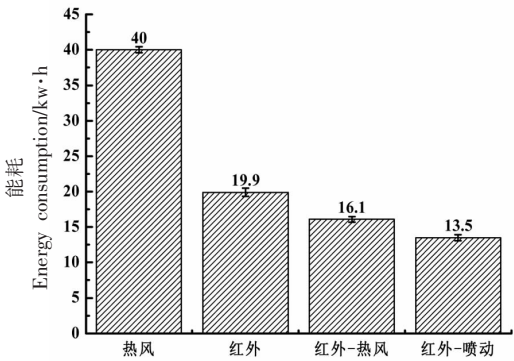


图 10 4 种干燥方式干燥带壳鲜花生的能耗

Fig.10 Energy consumption of four drying methods for fresh peanut with shell

增后减再增的趋势,说明花生仁在干燥中期会发生不同于外界的湿度变化;花生壳硬度在干燥过程中先降低后升高。通过理化分析,发现在 4 种干燥方式下,花生仁中氨基酸和脂肪酸含量明显下降 ($P<0.05$),热风和红外干燥的花生仁氨基酸含量并无显著差异 ($P>0.05$),红外-热风和红外-喷动干燥的花生仁脂肪酸含量无显著差异 ($P>0.05$)。对比 4 种干燥方式下能耗量,红外-喷动干燥可以大幅度减少能源消耗,节约资源,更符合现代工业的要求。通过不同干燥方式的对比,确定红外-喷动干燥方法对带壳鲜花生的干燥效果最佳,同时也进一步为红外-喷动技术用于其它带壳类物料的干燥提供了理论支持。

参 考 文 献

- [1] MIHAJLOVIC L, RADOSAVLJEVIC J, NORDLUND E, et al. Peanut protein structure, polyphenol content and immune response to peanut proteins *in vivo* are modulated by laccase[J]. Food and Function, 2016, 7(5): 2357-2366.
- [2] 高连兴, 陈中玉, CHEN C, 等. 美国花生收获机械化技术衍变历程及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 1-9.
GAO L X, CHEN Z Y, CHEN C, et al. Development course of peanut harvest mechanization technology of the United States and enlightenment to China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 1-9.
- [3] 国家统计局. 年度数据-主要农作物产品产量[R]. 北京: 国家统计局, 2020.
National Bureau of Statistics. Annual data-Yield of main crop products[R]. Beijing: National Bureau of Statistics, 2020.
- [4] 沈飞, 刘鹏, 蒋雪松, 等. 基于电子鼻的花生有害霉菌种类识别及侵染程度定量检测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 297-302.
SHEN F, LIU P, JIANG X S, et al. Recognition of harmful fungal species and quantitative detection of fungal contamination in peanuts based on electronic nose technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 297-302.
- [5] 周凯, 徐振林, 曾庆中, 等. 花生(油)中黄曲霉毒素的污染、控制与消除[J]. 中国食品学报, 2018, 18(6): 229-239.
ZHOU K, XU Z L, ZENG Q Z, et al. Aflatoxin in peanut(oil): A review on the contamination survey, control and elimination methods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(6): 229-239.
- [6] MWAKINYALI S E, DING X X, MING Z, et al. Recent development of aflatoxin contamination bio-control in agricultural products[J]. Biological Control, 2019(128): 31-39.
- [7] 杨潇. 新鲜花生热风干燥试验研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2017.
YANG X. Experimental study on fresh peanut hot air drying[D]. Beijing: China Academy of Agricultural Mechanization, 2017.
- [8] 王安建, 高帅平, 田广瑞, 等. 花生热泵干燥特性及动力学模型[J]. 农产品加工, 2015(9): 57-60.
WANG A J, GAO S P, TIAN G R, et al. Drying characteristics and dynamic model of peanut heat pump[J]. Processing of Agricultural Products, 2015(9): 57-60.
- [9] SALEHI F, KASHANINEJAD M, JAFARIANLARI A. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices[J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 53(5): 1751-1759.
- [10] RATSEEWOW J, MEESO N. Changes in amino acids and bioactive compounds of pigmented rice as affected by far-infrared radiation and hot air drying[J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125644.
- [11] 段续, 张萌, 任广跃, 等. 玫瑰花瓣红外喷动床干燥模型及品质变化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 238-244.
DUAN X, ZHANG M, REN G Y, et al. Drying models and quality changes of rose subjected to infrared assisted spouted bed drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8): 238-244.
- [12] FILIPPIN A P, MOLINA F L, FADEL V, et al. Thermal intermittent drying of apples and its effects on energy consumption[J]. Drying Technology, 2018, 36(14): 1662-1677.
- [13] SEREMET L, BOTEZ E, NISTOR O V, et al. Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices[J]. Food Chemistry, 2016, 195: 104-109.
- [14] 刘云宏, 李晓芳, 苗帅, 等. 南瓜片超声-远红外辐射干燥特性及微观结构[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 277-286.
LIU Y H, LI X F, MIAO S, et al. Drying characteristics and microstructures of pumpkin slices with ultrasound combined far-infrared radiation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 277-286.
- [15] 臧容宇. 燕麦籽粒硬度影响因素及其与品质关系的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
ZANG R Y. Study on influencing factors of oat grain hardness and its relationship with quality[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018.

- [16] 卢映洁, 任广跃, 段续, 等. 热风干燥过程中带壳鲜花生水分迁移特性及品质变化[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 86–92.
LU Y J, REN G Y, DUAN X, et al. Moisture migration properties and quality changes of fresh in-shell peanuts during hot air drying[J]. Food Science, 2020, 41(7): 86–92.
- [17] 魏晋梅, 刘彩云, 方彦, 等. 沙棘果油脂脂肪酸与微量元素测定[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(2): 268–273.
WEI J M, LIU C Y, FANG Y, et al. Determination of fatty acid compositions and trace elements in sea buck thorn fruit oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(2): 268–273.
- [18] 王馨雨, 王蓉蓉, 王婷, 等. 不同品种百合内外鳞片游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 211–220.
WANG X Y, WANG R R, WANG T, et al. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating the free amino acid composition of inner and outer lily bulb scales from different cultivars[J]. Food Science, 2020, 41(12): 211–220.
- [19] 刘宗博, 张钟元, 李大婧, 等. 双孢菇远红外干燥过程中内部水分的变化规律[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 82–86.
LIU Z B, ZHANG Z Y, LI D J, et al. Analysis of moisture change during far-infrared drying of *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2016, 37(9): 82–86.
- [20] 朱丹实, 王立娜, 励建荣, 等. 冰温及冷藏对鲤鱼水分迁移及质构的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(10): 152–159.
ZHU D S, WANG L N, LI J R, et al. Effects of the ice storage and cold storage on migration of moisture and texture changes of carp[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(10): 152–159.
- [21] 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.
- [22] LIU Y H, SUN C Y, LEI Y Q, et al. Contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying on pear slices: Effects on drying characteristics, microstructure, and quality attributes[J]. Drying Technology, 2019, 37(6): 745–758.
- [23] 范小平, 王雅君, 邹子爵, 等. 食品物料的收缩变形特性及其对干燥过程的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(9): 227–231.
FAN X P, WANG Y J, ZOU Z J, et al. Shrinkage deformation characteristics of food material and its effect on the drying process[J]. The Food Industry, 2018, 39(9): 227–231.
- [24] ABBAS A M, ANOWARUL I M, OTHMAN N H, et al. Effect of heating on oxidation stability and fatty acid composition of microwave roasted groundnut seed oil[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(13): 4335–4343.
- [25] SHI R, GUO Y, VRIESEKOOPE F, et al. Improving oxidative stability of peanut oil under microwave treatment and deep fat frying by stearic acid-surfactant-tea polyphenols complex[J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2015, 117(7): 1008–1015.
- [26] 王海鸥, 胡志超, 陈守江, 等. 收获时期及干燥方式对花生品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 292–300.
WANG H O, HU Z C, CHEN S J, et al. Effects of different harvesting dates and drying methods on peanut quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(22): 292–300.
- [27] 医学名词审定委员会, 肠外肠内营养学名词审定分委员会. 肠外肠内营养学名词[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 22–47.
Medical Terminology Validation Committee, Parenteral and Enteral Nutrition Terminology Validation Subcommittee. Parenteral and enteral nutrition [M]. Beijing: Science Press, 2019: 22–47.
- [28] 戚繁. 美拉德反应在食品工业中的研究进展[J]. 现代食品, 2020(19): 44–46.
QI F. Research progress of Maillard reaction in food industry[J]. Modern Food, 2020(19): 44–46.
- [29] 刘雷. 美拉德反应对花生分离蛋白结构及酶解特性影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
LIU L. Effect of Maillard reaction on structure and enzymatic hydrolysis of peanut protein isolate [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [30] 何微. 浅谈电磁辐射和微波的生物学效应[J]. 临床医药文献电子杂志, 2017, 4(63): 12460.
HE W. A brief talk on the biological effects of

electromagnetic radiation and microwaves [J]. Electronic Journal of Clinical Medicine Literature, 2017,

4(63): 12460.

Characterization of Texture, Nutrients and Energy Consumption of Fresh Flowers with Shell under Different Drying Methods

Zhu Kaiyang¹, Ren Guangyue^{1,2*}, Duan Xu^{1,2}, Li Linlin^{1,2}, Zhao Lujie¹, Liu Panpan¹

(¹College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan

²Henan Collaborative Innovation Center for Grain Storage Security, Zhengzhou 450001)

Abstract Hot air, infrared, infrared hot air and infrared spray drying techniques were used to dry fresh flowers with shell. The changes of peanut shell structure, nutritional components and energy consumption of peanut kernel during drying were investigated. The results showed that the dehydration rate of fresh peanut with shell was faster and the energy consumption was significantly reduced. Compared with hot air, infrared and infrared hot air drying, the dehydration time was shortened by 40%, 33% and 14%, and the energy consumption was reduced by 66%, 32% and 16% respectively. With the drying process going on, the reticular structure deformation of peanut shell and peanut kernel was obvious, and the porosity increased, and the maximum value was obtained under the infrared spouting condition. Under the four drying conditions, the hardness of peanut shell decreased at first and then increased, while the hardness of peanut kernel showed a trend of first increasing, then decreasing and then increasing; under the infrared spray drying mode, the decline rate of amino acid and fatty acid was 3.83% and 4.07% respectively compared with the fresh flowers without drying treatment, while the hot air drying, infrared drying and infrared hot air drying were not obvious. The degradation rates of amino acids and fatty acids were 9.53%, 7.77%, 9.06%, 9.27% and 5.83%, 4.97%, respectively. The experimental results showed that the infrared spouting drying was superior to the other three drying methods. It also provided theoretical support for the infrared spouting drying technology to be used in the drying of other shelled materials.

Keywords drying; fresh peanut in shell; hardness; amino acids; fatty acids; energy consumption