

5 种干燥方式对花生干燥特性及品质的影响

谢永康¹ 王 茜² 巨浩羽² 王玮娜³ 王晓东⁴

(1. 河南省农业科学院农产品加工研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061; 3. 河南天赫伟业能源科技有限公司, 河南 郑州 450002; 4. 青海省生产力促进中心有限公司, 青海 西宁 810000)

摘要: [目的] 确定花生适宜的机械干燥技术。[方法] 以新鲜花生为原料, 采用热泵干燥 (HPD)、远红外干燥 (FID)、电加热干燥 (EHD)、远红外联合热泵干燥 (FI-HPD) 及自然晾晒 (ND) 5 种干燥方式对花生进行干燥, 对比不同干燥方式对花生干燥时间、单位能耗、干燥速率、营养品质、色泽、质地、发芽率的影响。[结果] 在 4 种机械干燥过程中, 花生的水分比、干燥速率随干燥时间的延长不断减小, 干燥过程均为降速干燥, 其中 FI-HPD 组的干燥时间最短, 单位能耗最低。干燥方式对蛋白质、油酸、亚油酸含量影响显著 ($P < 0.05$), 对脂肪含量影响不显著, 4 种机械干燥后, EHD 和 FI-HPD 组花生的蛋白质含量较高、油酸含量较低。干燥方式对花生的色泽、硬度、黏附性也有显著影响 ($P < 0.05$)。机械干燥后, 花生的酸价为 0.75~2.00 mg/g, 过氧化值为 0.03~0.14 mg/g, 符合国家标准。4 种机械干燥后, 花生的发芽指数均有一定程度的降低, 其中 FI-HPD 组的花生发芽率和发芽势下降最多, HPD 和 FID 组的发芽指数均 $> 90\%$ 。[结论] FI-HPD 适用于食用花生干燥加工, HPD 和 EHD 适用于花生种子干燥加工。

关键词: 花生; 干燥方式; 干燥特性; 营养品质; 发芽率

Effects of five drying methods on the drying characteristics and quality of peanuts

XIE Yongkang¹ WANG Xi² JU Haoyu² WANG Weina³ WANG Xiaodong⁴

(1. Agricultural Product Processing Research Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, Henan 450002, China; 2. College of Biological Science and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 3. Henan Tianhe Weiye Energy Technology Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450002, China; 4. Qinghai Province Productivity Promotion Center Co., Ltd., Xining, Qinghai 810000, China)

Abstract: [Objective] To determine the appropriate mechanical drying technology for peanuts. [Methods] Fresh peanuts were used as raw materials. The effects of heat pump drying (HPD), far infrared drying (FID), electric heating drying (EHD), far infrared combined heat pump drying (FI-HPD), and natural drying (ND) on drying time, unit energy consumption, drying rate, nutritional quality, color, texture, and germination rate were compared and analyzed. [Results] During the four mechanical drying methods, the moisture ratio and drying rate of peanuts decreased with the prolongation of drying time, and the drying process was a falling-rate drying phase. Among these, the FI-HPD group had the shortest drying time and the lowest unit energy consumption. The drying method significantly affected the content of protein, oleic acid, and linoleic acid ($P < 0.05$), but had no significant effect on fat content. After the four mechanical drying methods, the protein content in peanuts was higher and the oleic acid content was lower in the EHD and FI-HPD groups. The drying method also significantly affected the color, hardness, and adhesion of peanuts ($P < 0.05$). After mechanical drying, the acid value was 0.75~2.00 mg/g, and the peroxide value was 0.03~0.14 mg/g, both conforming to national standards. After the four mechanical drying methods, the germination index of peanuts decreased to some extent, with the FI-HPD group showing the greatest reduction in germination rate and germination

基金项目: 河南省农业科学院基础性科研工作项目 (编号: 2024XK12); 河南省中央引导地方发展资金项目 (编号: Z20231811181)

通信作者: 王晓东 (1990—), 男, 青海省生产力促进中心有限公司助理研究员。E-mail: 517448371@qq.com

收稿日期: 2024-07-26 **改回日期:** 2025-02-18

引用格式: 谢永康, 王茜, 巨浩羽, 等. 5 种干燥方式对花生干燥特性及品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 197-203.

Citation: XIE Yongkang, WANG Xi, JU Haoyu, et al. Effects of five drying methods on the drying characteristics and quality of peanuts[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 197-203.

potential. The germination index of the HPD and FID groups was higher than 90%. [Conclusion] FI-HPD is suitable for the drying processing of edible peanuts, while HPD and EHD are suitable for the drying processing of peanut seeds.

Keywords: peanuts; drying method; drying characteristics; nutritional quality; germination rate

花生是一种具有较高营养价值的油料作物。国家统计局公布数据显示,自 2012 年以来,中国花生产量稳居世界第一,2023 年产量已高达 1 923.07 万 t^[1]。然而,新鲜花生含水率较高,贮藏有一定难度,且收获季节高温高湿,若不及时干燥,易发生霉变^[2]。

目前,中国花生产地多以自然晾晒的方式干燥花生,但该方法易受天气变化影响,晾晒过程也易受沙尘等污染,且效率低下,需要消耗大量的人力和时间^[3]。为更好地满足花生产地实际的生产需求,研发高效且经济的机械干燥技术日趋迫切^[4]。在农产品干燥领域,常见的干燥技术有热风干燥、热泵干燥、红外干燥、微波干燥及联合干燥等^[5]。热风干燥技术具有成本投入少、操作简单等优势,但干燥能耗大、干后花生品质不稳定。Qu 等^[6]研究发现,干燥温度 $\leq 45^{\circ}\text{C}$ 才能有效保证花生热风干燥后的品质。热泵干燥技术具有能耗低、处理量大等优势,但存在前期物料升温慢,后期干燥效率低,干后品质差等问题。谢永康等^[7]探究了适宜花生热泵干燥的工艺参数,即物料温度 45°C 、装载量 1 000 g/盘、风速 1.2 m/s。红外干燥技术的热效应好、干燥速率较快,但处理量小、能量利用率低^[8-9]。微波干燥技术具有干燥速率快、节能高效、反应灵敏、易控制等优势,但高强度的微波容易影响花生的干后品质^[10-11]。由于单一的干燥方法很难满足花生产地实际干燥需求,目前一系列联合干燥新技术也逐渐被应用于新鲜花生的干燥。宁阳阳等^[12]研究发现,热风—红外分段组合干燥得到的花生品质优于单一热风干燥和单一红外干燥,其干燥时间和能耗与红外干燥接近,优于热风干燥。朱凯阳等^[13]发现微波冷冻干燥较单一微波干燥和热风干燥更能保证花生干后品质,但该技术能耗高于其他联合干燥技术。Zhu 等^[14]采用红外喷动床干燥技术对花生进行干燥,相比热风干燥和红外干燥,该技术可缩短干燥时间、降低能耗,但其干燥设备较复杂,覆盖面积大,从经济方面考虑,红外辅助喷床干燥不适用于大规模的工业应用。

由于不同学者所选取的花生品种、设备装载量及外界环境条件等存在差异,研究结果得出的适宜干燥技术也存在差异性,且目前在花生干燥领域并未见将远红外联合热泵干燥这一新型干燥技术与自然晾晒和常规干燥技术进行对比探究,验证其可行性。研究拟采用自制的多功能碳纤维远红外联合热泵干燥机,将热泵干燥(HPD)、电加热干燥(EHD)、远红外干燥(FID)、远红外联合热泵干燥(FI-HPD)及自然晾晒(ND)用于花生的干燥,以干燥时间、单位能耗、干燥速率、营养品质、色泽、质构及发芽指数等为综合指标,进行 5 种不同干燥方式的对比探究,以期获得一种最优的花生机械干燥技术,为花生领

域的产地实际应用提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料、试剂

新鲜花生:品种为白沙,市售。选取同一批次,大小、长度 $[(35\pm 5)\text{mm}]$ 均一,新鲜且无机械损伤,洗净除杂后沥水,用自封袋密封,置于 4°C 冰箱内保存备用,1 周内用完,试验前取出,按 GB 5009.3—2016 测得样品平均初始湿基含水率为 $(22.6\pm 1.1)\%$;

石油醚、乙醚、次氯酸钠、异丙醇等均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

近红外成分分析仪:DA7250 型,波通瑞华科学仪器有限公司;

恒温恒湿培养箱:HWS-1000L 型,上海左乐仪器有限公司;

精密可编程烘箱:BXH-130S 型,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;

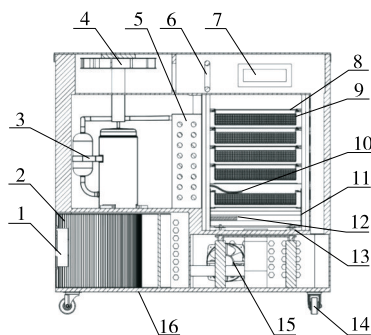
色差仪:CS-820N 型,天津市顺诺仪器科技有限公司;

酸价—过氧化值检测仪:LD-SG12 型,山东莱恩德智能科技有限公司;

物性测定仪:TMS-Pro 型,美国 FTC 公司;

冠亚快速水分测定仪:WL-02X 型,深圳冠亚水分仪科技有限公司;

碳纤维远红外联合热泵干燥机:自制(见图 1),该设备集电加热干燥、热泵干燥、远红外干燥和远红外联合热泵干燥等多种功能于一体,主要由干燥箱体、控制系统、加热单元、除湿单元以及气流循环单元组成^[15]。



1. 轴流风机 2. 冷凝管 3. 压缩机 4. 风机 5. 冷凝管 6. 加热管 7. 触控屏 8. 红外板 9. 料盘 10. 温度传感器 11. 称重料架 12. 温湿传感器 13. 称重传感器 14. 万向轮 15. 除湿风机 16. 干燥机箱

图 1 碳纤维远红外联合热泵干燥设备示意图

Figure 1 Schematic diagram of carbon fiber far infrared combined heat pump drying equipment

1.3 试验方法

4种机械干燥方式采用相同的工艺参数(温度45℃,风速1.2 m/s,装载量1 000 g/盘),为保证各组受热温度相同,待设备预热到目标温度后,将花生置于干燥室内,干燥至花生湿基含水率<10%,记录试验所用电量和干燥时间;同时,设置自然晾晒对照组。各试验组铺设样品厚度一致[(35±5) mm],记录各组花生湿基含水率达到10%时所需时间[对照组干燥时间为(30±0.45) h]。试验结束后,于4℃冰箱内贮藏各组样品,两周内完成干燥后样品的品质检测试验。

1.3.1 干燥特性指标

(1) 水分比(MR):按式(1)计算^[16]。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (1)$$

式中:

M_0 ——花生干燥初始的干基含水率,g/g;

M_t ——花生干燥至 t 时刻的干基含水率,g/g;

M_e ——花生停止干燥时的干基含水率,g/g。

(2) 干燥速率(DR):按式(2)计算^[17]。

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_1 - t_2}, \quad (2)$$

式中:

M_{t1} ——花生干燥至 t_1 时刻的干基含水率,g/g;

M_{t2} ——花生干燥至 t_2 时刻的干基含水率,g/g。

(3) 干基含水率(M_t):按式(3)计算。

$$M_t = \frac{W_t - G}{G}, \quad (3)$$

式中:

G ——花生绝干部分的质量,g;

W_t ——花生干燥至 t 时刻的总质量,g。

1.3.2 单位能耗 按式(4)计算^[15]。

$$U = \frac{Q}{m}, \quad (4)$$

式中:

U ——干燥所需的单位能耗,(kW·h)/kg;

m ——花生干燥结束时脱除水分的质量,kg;

Q ——干燥所用电量,kW·h。

1.3.3 营养品质测定 参照Xie等^[3]的方法。

1.3.4 酸价和过氧化值测定 参照GB 5009.6—2016分别提取各组花生仁的油脂,使用LD-SG12酸价—过氧化值检测仪对得到的油脂进行酸价和过氧化值检测。

1.3.5 色泽测定 对花生进行去壳处理,经CS—820N色差仪测定花生仁的明亮度(L^*)、红绿值(a^*)和黄蓝值(b^*),每组测定6个样品取平均值。

1.3.6 质构测定 经TMS-Pro物性测定仪测定样品的硬度、弹性、黏附性和咀嚼性。各组分别选取10个大小、形状相对接近的花生仁样品,采用圆形探头(直径75 mm),

设置触发力为5 N;距离为30 mm;测试速度为1 mm/s;压缩程度为40%。每组测定6个样品,去除最大值和最小值后求平均值。

1.3.7 发芽势和发芽率测定 参照杜琪等^[18]的方法,并分别按式(5)和式(6)计算发芽势和发芽率。

$$GP = \frac{N_1}{N} \times 100\%, \quad (5)$$

$$GR = \frac{N_2}{N} \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

GP ——花生种子的发芽势,%;

N_1 ——培养3 d时的发芽种子数,粒;

N ——试验种子数,粒;

GR ——花生种子的发芽率,%;

N_2 ——培养6 d时的发芽种子数,粒。

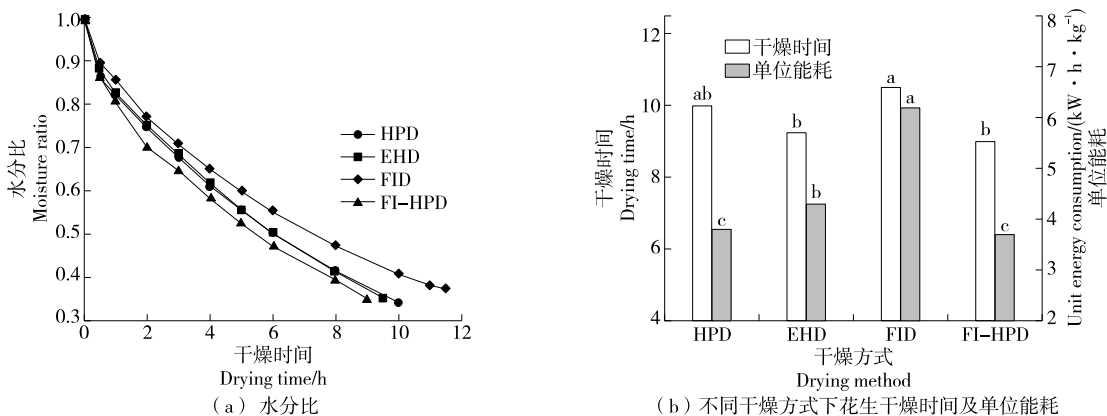
1.3.8 数据分析 使用Excel 2022软件进行数据整理,SPSS 25.0软件进行显著性差异分析,采用Origin 2023软件绘图。所有试验至少重复3次,结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 干燥方式对花生干燥特性的影响

2.1.1 水分比、干燥时间和能耗 由图2可知,干燥方式对花生的水分比、干燥时间和单位能耗影响显著($P < 0.05$),水分比随着干燥时间的延长不断减小。干燥结束时,FID、HPD、EHD、FI-HPD组所需时间分别为10.75, 10.00, 9.50, 9.00 h,所需单位能耗分别为6.2, 3.8, 4.3, 3.7 (kW·h)/kg。4种机械干燥方式的干燥时间显著少于ND组($P < 0.05$),其中FI-HPD组所需干燥时间低于其他3种机械干燥方式,相比单一HPD、FID组分别缩短了约10%,16%,这是由于FID可以穿透花生表面,直接耦合花生内部水分,使得温度迅速升高,内部水分外迁加快,同时热泵提供的热风不断带走花生表面水分,与FID联合发挥作用,脱水效果优于单一HPD、FID组。FID组的单位能耗最高,FI-HPD组的单位能耗最低,相比FID组降低了约40%,说明HPD的节能效果优异,与FID联合可以弥补FID高能耗这一缺陷。综上,FI-HPD在4种机械干燥方式中具有高效、节能的优势。

2.1.2 干燥速率 由图3(a)可知,干燥方式对花生的干燥速率影响显著($P < 0.05$),且4种干燥方式下均呈降速干燥趋势,这是由于花生的干燥速率取决于花生表面水分蒸发速率和内部水分的扩散速率^[19]。干燥前期,花生的干燥速率下降较快,这是因为花生的初始含水率较高且大部分水分为自由水,很容易脱除;花生是由花生壳和花生仁两种不同的组分构成,花生壳的主要成分为粗纤维,孔隙较大,先于花生仁接触热空气发生水分迁移,其水分在前期迅速降低^[20]。干燥后期,干燥进程均趋于缓



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同干燥方式下花生的干燥特性

Figure 2 Drying characteristics of peanuts under different drying methods

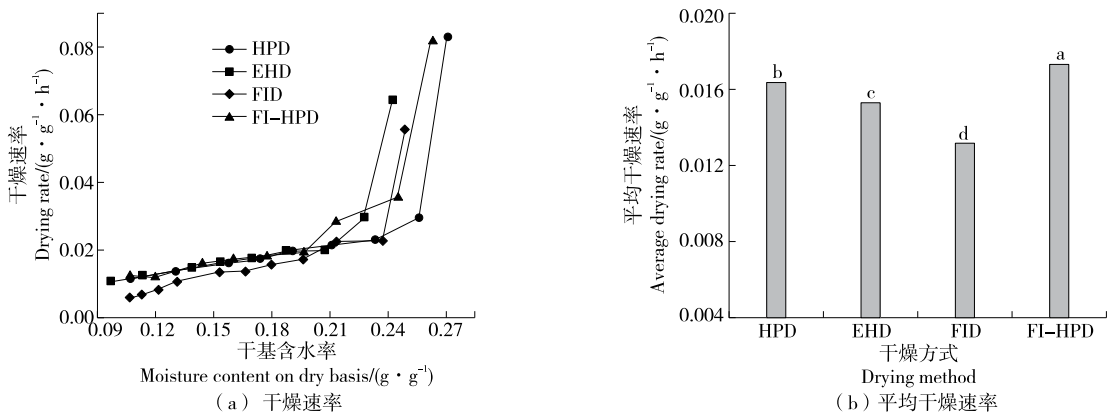
慢,一方面是由于花生的半结合水及结合水不易被脱除,导致干燥过程变得缓慢^[8];另一方面,干燥后期,花生仁与壳之间的空气隔层变大,影响花生仁的传热传质速率,从而减慢了干燥的进行^[21]。

由图 3(b)可知,FID组的平均干燥速率最低,这是由于远红外的穿透性使花生仁快速受热,内部水分迁移到物料表面,物料表面和干燥介质表面水蒸气分压差变小,表面水分蒸发速度降低,导致干燥时间较长,平均干燥速率较低;FI-HPD组的平均干燥速率最高,这是由于在红外线发挥其穿透作用的同时,热泵提供的热风也不断发挥其排湿功能,带走花生表面水分,保证物料内部至表面的水分梯度,促进内部水分的扩散迁移,也有利于保证花生表面和干燥介质间的水蒸气分压差,进而导致内部迁移扩散至表面的水分更容易蒸发,经FID和HPD的联合作用,物料脱水速度较高,因此整体平均干燥速率最高。HPD和EHD干燥下花生仁内部升温较慢,内部水分子的活跃度较低,因此水分不易向外迁移,同时,热风迅速带

走花生表面大量水分,而内部水分不能及时迁移至表面,因此花生会有不同程度的结壳堵塞现象,进一步阻碍内部水分的迁移,延缓其干燥进程。

2.2 干燥方式对花生营养品质的影响

由表 1 可知,干燥方式对花生蛋白质、油酸、亚油酸含量影响显著 ($P < 0.05$),对脂肪含量影响不显著。与ND组相比,EHD和FI-HPD组的蛋白质含量无明显变化,FID组的蛋白质含量显著下降 ($P < 0.05$),可能是FID干燥时间较长,辐射强度较大,干燥过程中的热效应与分子振动破坏了蛋白质的氢键,一定程度上破坏了其 α -螺旋结构,导致蛋白质含量降低,与凡威^[22]的结论一致;而FI-HPD组的干燥时间较短,辐射强度较小,此干燥方式下的蛋白质呈现较高保留率,表明联合干燥能改善单一FID方式的花生蛋白质流失严重这一缺陷。干燥过程中的温度和含水量等条件的变化会引起花生仁中脂肪酸发生不同程度的化学反应,特别是不饱和脂肪酸因其含有碳碳双键极易被氧化^[14]。FID组的油酸含量增加,可能是干燥过程中



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 不同干燥方式下花生的干燥速率图

Figure 3 Drying rate of peanuts under different drying methods

亚油酸被氧化成了油酸。EHD和FI-HPD组的油酸含量显著降低($P<0.05$),表明油酸的水解、氧化等反应相较于其他方式进行的程度更大;亚油酸含量显著增加($P<0.05$),可能是亚麻酸等其他脂肪酸转化成了亚油酸,且亚油酸的生成程度大于其氧化程度。油酸和亚油酸含量的变化趋势相反,与谢永康等^[7]的研究结果一致。

表1 不同干燥方式下花生的营养品质[†]

Table 1 Nutritional quality of peanuts under different drying methods %

干燥方式	脂肪	蛋白质	油酸	亚油酸
ND	49.90±0.13	23.47±2.08 ^a	57.13±1.50 ^{ab}	30.90±0.93 ^{bc}
HPD	49.96±0.55	21.34±0.74 ^{ab}	56.82±1.56 ^{ab}	32.09±2.06 ^b
EHD	50.04±0.48	22.79±0.38 ^a	54.40±0.99 ^b	33.86±1.26 ^{ab}
FID	50.74±0.23	20.53±0.83 ^b	60.72±1.98 ^a	30.02±0.75 ^c
FI-HPD	49.85±0.68	23.25±1.11 ^a	55.70±3.85 ^b	34.74±1.51 ^a

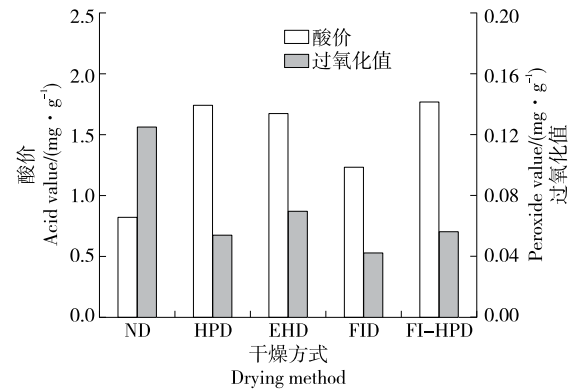
† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.3 干燥方式对花生酸价和过氧化值的影响

花生所含的大部分油脂为不饱和脂肪酸,极易发生氧化反应,致使油脂酸败^[23],降低花生的食用品质和营养价值。由图4可知,干燥方式对花生的酸价和过氧化值均有显著影响($P<0.05$)。与ND组相比,经4种机械干燥后,花生的过氧化值均下降(8%~44%),酸价均显著上升(51%~115%),可能是由于油脂在机械化干燥过程中氧化水解程度较大,产生大量的过氧化物和游离脂肪酸,且随着干燥的持续进行,产生的氢过氧化物开始分解为其他的醛、酮、低级脂肪酸等小分子物质,其分解速度开始大于生成速度,最终导致过氧化值减小,酸价显著升高,油脂过度酸败^[24-25],致使花生品质严重下降。FI-HPD组的酸价最高,其酸败程度最高,与HPD组和EHD组无显著性差异。干燥后,花生的酸价为0.75~2.00 mg/g,过氧化值为0.03~0.14 mg/g,均符合GB 19300—2014的规定(酸价 ≤ 3 mg/g,过氧化值 ≤ 5 mg/g)。

2.4 干燥方式对花生色泽及质构的影响

由表2可知,干燥方式对花生仁的 L^* 、 a^* 影响显著



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图4 不同干燥方式下花生的酸价和过氧化值

Figure 4 Acid value and peroxide value of peanuts under different drying methods

($P<0.05$),对 b^* 影响不显著。与ND组相比,HPD和EHD组花生仁的 L^* 显著降低($P<0.05$),EHD和FI-HPD组花生仁的 a^* 显著降低($P<0.05$),可能是花生仁在受热过程中组织受到一定程度的损伤,致使酚类物质与酚酶接触,引发了色素变化和氧化反应,促使褐变发生^[26],进而显著影响花生仁的 L^* 和 a^* ;FID组的色泽无显著性变化,可能是因为FID穿透厚度较浅,其干燥形式模拟自然晾晒,干燥强度较小,因此对色泽的影响较小。

干燥方式对花生的硬度、黏附性以及弹性影响显著($P<0.05$),对咀嚼性无显著影响。与ND组相比,4种干燥方式下花生的黏附性和弹性降低,硬度显著增大($P<0.05$)。这是因为干燥使得花生仁的水分含量不断减少,最终导致其韧性降低,硬度增大;且花生壳在干燥后期产生收缩,孔隙率降低,密度增大,进而硬度增大^[27]。其中,HPD和EHD组的花生硬度最大,FID组的花生硬度最小,FI-HPD组的花生硬度居中,这是由于HPD和EHD为常规热风干燥,传热传质方向相反,干燥时间长,造成花生仁外部容易结壳,硬度增大,而远红外具有内部加热功能,可缓解结壳程度。4种机械干燥后,花生仁的黏附性和弹性均降低,可能是由于花生水分迁移过快。

表2 干燥方式对花生色泽及质构的影响[†]

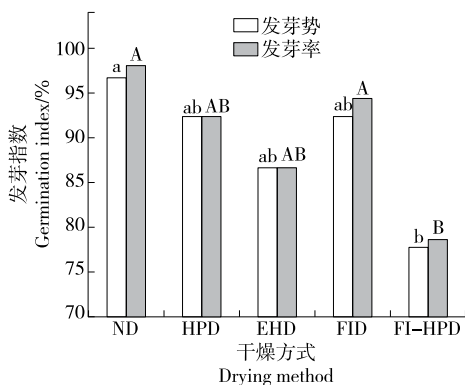
Table 2 Effects of drying methods on the color and texture of peanuts

干燥方式	L^*	a^*	b^*	硬度/N	黏附性/mJ	弹性/mm	咀嚼性/mJ
ND	53.24±0.83 ^{ab}	14.70±0.48 ^a	18.83±0.50	81.56±1.29 ^c	0.47±0.18 ^a	0.61±0.04 ^a	6.16±0.37
HPD	50.70±0.91 ^b	13.75±0.48 ^{ab}	21.09±0.96	104.81±1.18 ^a	0.22±0.02 ^{bc}	0.50±0.01 ^b	5.34±0.65
EHD	50.61±0.80 ^b	13.27±0.42 ^b	20.47±0.75	110.11±1.31 ^a	0.13±0.05 ^c	0.52±0.03 ^b	6.63±0.58
FID	55.05±0.86 ^a	13.74±0.82 ^{ab}	20.22±0.99	84.70±1.09 ^{bc}	0.21±0.09 ^{bc}	0.58±0.03 ^a	5.35±0.60
FI-HPD	51.69±0.94 ^{ab}	13.43±0.64 ^b	20.93±0.50	98.15±1.25 ^{ab}	0.34±0.09 ^{ab}	0.50±0.01 ^b	5.47±0.74

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.5 干燥方式对花生发芽指数影响

由图 5 可知,干燥方式对花生的发芽指数影响显著($P<0.05$)。与 ND 组相比,4 种机械干燥方式的发芽势和发芽率均有所降低,其中 FI-HPD 的发芽特性最差,可能是 FI-HPD 方式下,远红外线和热泵的联合作用使物料内部温度升高太快,较大的干燥强度导致多数花生仁的质膜结构遭到破坏,使其不能正常萌发^[28],同时温度过高使得种子酶的活性降低,进而减弱种子的萌发能力^[18],表明 FI-HPD 并不适用于花生种子干燥加工;而 HPD 和 FID 组的发芽指数均 $>90\%$,对于种用花生干燥来说,这两种干燥方式值得考虑。



字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

图 5 不同干燥方式下花生的发芽指数

Figure 5 Germination index of peanuts under different drying methods

3 结论

热泵干燥 (HPD)、电加热干燥 (EHD)、远红外干燥 (FID)、远红外联合热泵干燥 (FI-HPD) 及自然晾晒 (ND) 4 种机械干燥方式的干燥进程相似,干燥速率均不断降低。远红外联合热泵干燥较远红外干燥、热泵干燥和电加热干燥具有高效、节能的优势,更能满足花生产地需求。干燥方式对花生蛋白质、油酸、亚油酸、色泽影响显著 ($P<0.05$),对脂肪含量影响不显著;远红外干燥能缓解结壳堵塞,得到的花生硬度最小,远红外联合热泵干燥的次之。与传统的自然晾晒相比,4 种机械干燥方式下的花生酸价均明显上升,过氧化值均下降,其中远红外联合热泵干燥下花生的发芽率和发芽势下降最多,而热泵干燥和远红外干燥的发芽率均 $>90\%$ 。综上,远红外联合热泵干燥适用于带壳鲜花生食用干燥加工,热泵干燥和远红外干燥适用于花生种子干燥加工。后续可进一步探究品种对花生干燥及品质的影响,并对不同干燥因素间的交互作用进行深入研究,同时,采用响应面法优化花生机械干燥工艺。

参考文献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024: 383-385.
Statistics Bureau of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2024: 383-385.
- [2] 陈鹏泉, 郭相毅, 王殿轩, 等. 花生荚果固定床网袋堆垛通风干燥实验研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(1): 167-173.
CHEN P X, GUO X Y, WANG D X, et al. Experimental study of peanut pods fixed-bed mesh bag stacking for ventilation drying[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(1): 167-173.
- [3] XIE Y K, LIN Y W, LI X Y, et al. Peanut drying: effects of various drying methods on drying kinetic models, physicochemical properties, germination characteristics, and microstructure[J]. Information Processing in Agriculture, 2023, 10(4): 447-458.
- [4] 王童, 杨慧, 朱广成, 等. 热风、微波及其联合干燥对花生营养特性及感官品质的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(9): 2 102-2 110.
WANG T, YANG H, ZHU G C, et al. Effects of hot air, microwave and combined drying on nutritional properties and sensory quality of peanut[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(9): 2 102-2 110.
- [5] 周巾英, 罗晶, 何家林, 等. 我国花生机械化干燥生产现状与发展[J]. 江西农业学报, 2019, 31(2): 66-69.
ZHOU J Y, LUO J, HE J L, et al. Current situation and development of mechanized dry production of peanut in China [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(2): 66-69.
- [6] QU C L, WANG X K, WANG Z W, et al. Effect of drying temperatures on the peanut quality during hot air drying[J]. Journal of Oleo Science, 2020, 69(5): 403-412.
- [7] 谢永康, 赵贺阳, 李萍, 等. 花生热泵干燥动力学及品质变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(14): 158-164.
XIE Y K, ZHAO H Y, LI P, et al. Study on drying kinetics and quality changes of peanut by heat pump[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14): 158-164.
- [8] SALEHI F, KASHANINEJAD M, JAFARIANLARI A. Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices[J]. Heat and Mass Transfer, 2017, 53 (5): 1 751-1 759.
- [9] 徐凤英, 陈震, 李长友, 等. 荔枝红外干燥均匀性与果壳孔隙分形色变研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 222-227, 235.
XU F Y, CHEN Z, LI C Y, et al. Uniformity of moisture content, shell pore fractal and discoloration of litchi during infrared drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 222-227, 235.
- [10] 王新智, 王天池, 吴玉柱, 等. 微波间歇干燥对玉米籽粒中淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 179-190.
WANG X Z, WANG T C, WU Y Z, et al. Effects of microwave intermittent drying on physicochemical properties of starch in

- corn kernels[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 179-190.
- [11] IZLI N, POLAT A. Effect of convective and microwave methods on drying characteristics, color, rehydration and microstructure properties of ginger[J]. Food Science and Technology, 2019, 39(3): 652-659.
- [12] 宁阳阳, 朱文学, 白喜婷, 等. 热风—红外分段组合干燥对带壳鲜花生品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 133-142.
- NING Y Y, ZHU W X, BAI X T, et al. Effect of sequential hot air-infrared drying on quality of fresh shelled peanuts[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(4): 133-142.
- [13] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 不同干燥方式对新鲜花生营养成分、理化特性及能耗的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(15): 230-236.
- ZHU K Y, REN G Y, DUAN X, et al. Effects of different drying methods on nutrients, physicochemical properties and energy consumption of fresh peanut[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(15): 230-236.
- [14] ZHU K Y, LI L L, REN G Y, et al. Efficient production of dried whole peanut fruits based on infrared assisted spouted bed drying[J]. Foods, 2021, 10(10): 2 383.
- [15] 谢永康, 李莹莹, 李萍, 等. 花生碳纤维远红外联合热泵干燥特性及品质研究[J]. 花生学报, 2022, 51(4): 80-89.
- XIE Y K, LI Y Y, LI P, et al. Study on drying characteristics and quality of peanut by carbon fiber far-infrared combined heat pump[J]. Journal of Peanut Science, 2022, 51(4): 80-89.
- [16] 戴碧亮, 孙静, 刘晓风. 百合热风薄层干燥特性及干燥品质[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 48-55, 218.
- XIAO B L, SUN J, LIU X F. Drying characteristics and drying quality of Lilium by hot-air thin-layer drying[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 48-55, 218.
- [17] XIE Y K, LI X Y, ZHANG Y, et al. Effects of high-humidity hot air impingement steaming on gastrodia elata: steaming degree, weight loss, texture, drying kinetics, microstructure and active components[J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 127: 255-265.
- [18] 杜琪, 赵新华, 耿雷跃, 等. 不同干燥温度对花生营养品质和发芽特性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(10): 2 254-2 260.
- DU Q, ZHAO X H, GENG L Y, et al. Effects of different drying temperatures on the nutritional quality and germination characteristics of peanut after harvest[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(10): 2 254-2 260.
- [19] 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.
- [20] 陈楠. 花生荚果热风干燥工艺优化及热质迁移模拟研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 60-65.
- CHEN N. Study on optimization of hot air drying process and simulation of heat and mass transfer of peanut pod[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 60-65.
- [21] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 不同干燥方式下带壳鲜花生质构、营养成分及能耗的表征[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 177-188.
- ZHU K Y, REN G Y, DUAN X, et al. Characterization of texture, nutrients and energy consumption of fresh flowers with shell under different drying methods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 177-188.
- [22] 凡威. 核桃滚筒式催化红外—热风联合干燥、品质及贮藏特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 63-67.
- FAN W. study on drying, quality and storage properties of walnut drying with drum catalytic infrared-hot air[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021: 63-67.
- [23] 王洁, 邹惠玲, 夏攀登, 等. 植物油脂氧化及其氧化稳定性研究进展[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(4): 207-210.
- WANG J, ZOU H L, XIA P D, et al. Research progress on oxidation and oxidative stability of vegetable oil[J]. Storage and Process, 2019, 19(4): 207-210.
- [24] 王世伟, 张自升, 卢兴稳, 等. 不同加热方式对花生油品质的影响[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(9): 112-115.
- WANG S W, ZHANG Z S, LU X W, et al. The influence of two heating processes on the quality of peanut oil[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2019, 44(9): 112-115.
- [25] 李尤好, 刘潇, 沈飞, 等. 高温储藏条件对花生油脂和蛋白质品质劣变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 105-111.
- LI Y H, LIU X, SHEN F, et al. Effect of high temperature storage condition on quality deterioration of peanut oil and protein[J]. Food Science, 2023, 44(13): 105-111.
- [26] 张金阳, 张锐, 金强, 等. 果蔬褐变机理及防治技术研究进展[J]. 绿色科技, 2024, 26(9): 106-111.
- ZHANG J Y, ZHANG R, JIN Q, et al. Advances in research on browning mechanism and control technology of fruits and vegetables[J]. Journal of Green Science and Technology, 2024, 26(9): 106-111.
- [27] 卢映洁. 带壳鲜花生热风—热泵联合干燥及贮藏过程中生物特性的研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020: 11-13.
- LU Y J. Study on the combined air-heat pump drying of fresh peanut with shell and the biological characteristics of peanut during storage[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020: 11-13.
- [28] 胡伟民, 段宪明, 阮松林. 超干水分长期贮藏对玉米、西瓜种子生活力和活力的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(1): 37-41.
- HU W M, DUAN X M, RUAN S L. Effects of ultra-dry treatment and long-term storage on viability and vigor of corn and watermelon seeds[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2002, 28(1): 37-41.