

红外辐射预处理对偏高水分核桃食用品质及货架期的影响

雷杨昊¹, 罗水忠^{1,2*}, 郑志^{1,2}, 姜绍通^{1,2}, 金龙³

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省农产品现代加工重点实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 洽洽食品股份有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: 该文分别通过热风干燥和红外辐射(infrared radiation, IR)预处理联合热风干燥2种方式, 将新鲜带壳核桃的含水量调节至4%、8%、12%和16%, 分析不同含水量核桃在25℃、55%~65%湿度条件贮藏90d期间的质构、感官、微观结构, 以及脂肪氧合酶和多酚氧化酶活性的变化, 通过一级动力学方程预测不同含水量核桃货架期, 探究IR预处理提升偏高水分核桃食用品质、延长其货架期的作用机制。结果显示, 与热风干燥对照组相比, IR预处理能够延缓偏高水分核桃贮藏期间酸价(降低4.79%~10.15%)、过氧化值(降低45.96%~72.48%)与丙二醛含量(降低14.07%~32.79%)上升, 减少多酚降解与可溶性醌生成, 显著抑制脂氧合酶和多酚氧化酶的活性, 同时感官特性得到提高; 随着含水量的升高, 核桃仁贮藏期间硬度和过氧化值减小, 感官评分上升(IR8%最高)后下降, 丙二醛含量减少, 货架期缩短, 脂氧合酶活性降低, 弹性和酸价增大, 可溶性醌含量增多, 多酚氧化酶活性升高。综合考虑食用品质和货架期, IR预处理新鲜带壳核桃2min联合热风干燥8h, 将含水量控制至8%左右是最佳处理工艺, 此工艺获得的偏高水分核桃既有良好的质地和口感, 又有较长的货架期。

关键词: 红外辐射预处理; 偏高水分核桃; 质构; 贮藏品质; 适度加工

Effect of Infrared Radiation Pretreatment on Edible Quality and Shelf Life of Walnuts with Relatively Higher Moisture

LEI Yanghao¹, LUO Shuizhong^{1,2*}, ZHENG Zhi^{1,2}, JIANG Shaotong^{1,2}, JIN Long³

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, Anhui, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Agricultural Products Modern Processing, Hefei 230601, Anhui, China;

3. Qiaqia Food Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: The moisture content of fresh shelled walnuts was adjusted to 4%, 8%, 12%, and 16%, respectively, by two ways of hot-air drying and infrared radiation (IR) pretreatment combined with hot-air drying, and the changes in the texture, sensory, microstructure, the activities of lipoxygenase and polyphenol oxidase of the walnuts with different moisture contents stored for 90 days at 25℃ and 55%–65% humidity were analyzed. The shelf life of the walnuts with different moisture contents was predicted based on the first-order kinetic equation. The mechanism of IR pretreatment to improve the edible quality and prolong the shelf life of walnuts with high moisture contents was explored. The results showed that compared with the hot-air drying control group, IR pretreatment could significantly delay the increase in acid values (reduced by 4.79%–10.15%), peroxide values (reduced by 45.96%–72.48%), and malondialdehyde contents (reduced by 14.07%–32.79%), reduce the degradation of polyphenol and the production of soluble quinone, and inhibit the activities of lipoxygenase and polyphenol oxidase of walnuts with relatively higher moisture during storage, while the sensory characteristics were improved. With the increasing moisture contents, the hardness and peroxide value of walnut kernels decreased during storage; the total score of sensory evaluation first increased (IR8% was the highest) and then decreased. Meanwhile, the malondialdehyde content decreased, and the shelf life shortened. The lipoxygenase activity decreased; elasticity, acid value, soluble quinone content, and polyphenol oxidase activity increased.

基金项目: 安徽省科技重大专项项目(202003a06020025); 安徽省科技攻坚计划项目(202423110050025)

作者简介: 雷杨昊(2000—), 男(汉), 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏。

*通信作者: 罗水忠(1975—), 男(汉), 教授, 博士, 研究方向: 粮油健康食品加工技术。

By considering the edible quality and shelf life, IR pretreatment of fresh shelled walnuts for two minutes, combined with hot-air drying for 8 h to control the moisture content of about 8% was the best treatment process. The walnuts with relatively higher moisture obtained by this process had both good texture and flavor, as well as a long shelf life.

Key words: infrared radiation pretreatment; walnuts with relatively higher moisture; texture; storage quality; moderate processing

引文格式:

雷扬昊,罗水忠,郑志,等. 红外辐射预处理对偏高水分核桃食用品质及货架期的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4):1-10.

LEI Yanghao, LUO Shuizhong, ZHENG Zhi, et al. Effect of Infrared Radiation Pretreatment on Edible Quality and Shelf Life of Walnuts with Relatively Higher Moisture[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4):1-10.

核桃(*Juglans regia* L.)属于胡桃科胡桃属植物,原产于欧洲东南部、西亚和南亚,当前在全球各地均有栽种与分布^[1]。核桃仁中含有大量的不饱和脂肪酸、蛋白质、维生素E、酚类等具有促进人体健康的功能性化学成分,是世界各地公认的高营养食品^[2]。然而,由于大量不饱和脂肪酸以及酚类物质的存在,在贮藏、加工、运输过程中,核桃仁易发生脂质氧化、颜色褪变、质构劣变以及营养物质的损失,影响其食用品质,甚至对人体产生有毒害的物质^[3]。

含水量是影响核桃的质构、食用体验、货架期的重要因素^[4],为保证核桃有一定的货架期,通常需要将其水分控制在安全含水量(8%)(8%及以上含水量为偏高水分核桃)^[5]。但是,为减少经济损失,工业上通常将核桃水分控制在5%以下(干制核桃)。在室温下,干制核桃通常有6~12个月的保质期,低温(-18℃)条件甚至能有18个月的保质期^[6],但干制核桃硬度较高、咀嚼体验差、口感干劣苦涩^[7]。近年来,含水量高于20%的鲜食核桃因其口味新奇、硬度较低、口感细腻,越来越受到人们的喜爱。但鲜食核桃货架期短,即使贮藏于-1~0℃条件下,也只有1个月的保质期^[8]。因此,如何对核桃进行适度干燥,使其含水量控制在适宜水平,实现既不影响其贮藏品质,又能保持其良好口感,无疑是核桃生产者、加工者与消费者的共同目标。

红外辐射(infrared radiation, IR)属于电磁辐射,红外线是介于可见光和微波之间的电磁波,波长为0.78~1 000 μm,通过表面反射、表面吸收和穿透吸收等方式作用于物料,物料吸收红外线而产生独特的热效应,如脱水干燥、杀虫灭菌、抑制脂质氧化、钝化酶活性等^[9-10]。研究表明,IR预处理使开心果脱水的同时,能够降低屎肠球菌细胞数量^[11];IR预处理带壳高水分(43%)核桃3~4 min,相当于常规热风干燥3 h,使其含水量减少7%,而对核桃的色泽和过氧化值没有不良影

响^[12]。前期研究发现,IR漂烫碧根果仁,能够抑制碧根果仁褐变,提高其贮藏稳定性^[13];IR预处理新鲜带壳碧根果2 min,使新鲜碧根果热风干燥时间缩短了25%~35%、总酚含量增加了5%~19%,抑制了碧根果贮藏期苯丙氨酸解氨酶、过氧化物酶活性,延缓了新鲜碧根果褐变^[14]。

本研究以热风干燥为对照,通过IR预处理联合热风干燥技术,对带壳新鲜核桃进行适度干燥,使其含水量为4%~16%,获得干制核桃和偏高水分核桃,分析它们在贮藏期间质地、感官等食用品质、微观结构、脂质氧化指数、总酚和可溶性酚含量以及脂氧合酶和多酚氧化酶活性等变化,探究IR预处理提升偏高水分核桃食用品质的作用机制,以期制备口感好、品质高、满足消费者需要的偏高水分核桃提供理论基础与技术支持。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

新鲜核桃[品种为‘温185’,初始含水量为(36.81±1.65)%]:洽洽食品股份有限公司;磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、碳酸钠、聚乙烯吡咯烷酮、邻苯二酚、无水乙醇、没食子酸、福林酚试剂、亚油酸(均为分析级):上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

DHG-9070A电热鼓风干燥箱:上海一恒科学仪器有限公司;HSR/1中红外加热器:德国Elstein公司;Hei-VAP ML旋转蒸发仪:德国Heidolph公司;TA-XT-Plus质构仪:英国Stable Micro System公司;G1-20G-II离心机:上海安亭科学仪器厂;FD-1B-50真空冷冻干燥机:北京博医康实验仪器有限公司;300扫描电子显微镜:德国卡尔蔡司光学有限公司;UA22超声清洗器:维根技术(北京)有限公司。

1.3 方法

1.3.1 核桃的适度加工

带壳新鲜核桃清洗、晾干表面水分后分为两组。一组进行 IR 预处理(红外辐射功率 700 W, 辐射时间 2 min, 红外辐射源离极板距离 14 cm)后立即取出, 自然冷却至室温, 此时含水量为(30.22±1.33)%; 随后用 63 °C 热风分别干燥 7、8、10、13 h, 获得含水量分别为 16%、12%、8% 的偏高水分核桃和含水量 4% 的干制核桃, 分别命名为 IR16%、IR12%、IR8%、IR4%。另一组直接通过 63 °C 热风干燥 8、9、11、14 h, 作为对照组, 分别命名为 CK16%、CK12%、CK8% 和 CK4%。最后将所有核桃样品装入自封袋中, 于 25 °C、55%~65% 湿度条件贮藏 90 d, 每隔 30 d 取样, 将核桃手工去除外壳, 取核桃仁, 进行质构、感官等分析。

1.3.2 核桃质构测定

核桃的质构特性使用质构仪测定^[15]。选择 P/36R 探头, 力量感应单元为 30 kg, 采用全质构分析(texture profile analysis, TPA)模式, 检测速度为 50 mm/s, 形变量 50%, 2 次压缩, 记录核桃仁的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性。

1.3.3 核桃感官评价

20 名评估员通过 9 点享乐测试(1 最低, 9 最高)对核桃的颜色、亮度、质地、风味和总接受度感官特性进行评分^[16]。

1.3.4 核桃仁的微观结构观察

将核桃仁切成大约 1 mm³ 的块状, 加入 2.5% (体积分)戊二醛固定液并于 4 °C 条件下过夜固定。随后使用 0.1 mol/L pH7.2 磷酸盐缓冲液冲洗样品 3 次(每次 10 min), 然后在乙醇系列溶液(10%、30%、50%、70%、90%、100%)中脱水, 然后使用真空冷冻干燥机冷冻干燥。样品横截面镀金, 然后用扫描电子显微镜观察其微观结构^[17]。

1.3.5 核桃脂质氧化指数测定

酸价、过氧化值、丙二醛含量分别依据 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》、GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》和 GB 5009.181—2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》中的方法进行测定。

1.3.6 核桃总酚、可溶性鞣含量测定

核桃仁中总酚和可溶性鞣含量参考 Gao 等^[18]的方法进行测定。将 1 g 碾碎的核桃仁加入 50 mL 70% 甲醇溶液中, 置于 100 W 超声清洗器中超声辅助提取 30 min; 提取液在 4 °C、10 000×g 条件下离心 20 min, 收集上清液, 用于总酚和可溶性鞣含量分析。取 1.0 mL 上清液放入试管中, 依次加入 0.5 mL 福林酚试剂和 1.0 mL 22% Na₂CO₃ 溶液, 充分涡旋后放置室温 120 min, 然后测定 765 nm 波长处吸光度, 总酚含量以

没食子酸当量(gallic acid equivalent, GAE)表示(单位为 mg GAE/g), 可溶性鞣含量以上清液在 437 nm 波长处的吸光度表示(OD_{437/g})。

1.3.7 核桃脂氧合酶、多酚氧化酶活性测定

1.3.7.1 酶的提取

取 2 g 液氮研磨的核桃仁浆, 加入 10 mL 蒸馏水和 10 mL 含有 1.5 g 聚乙烯吡咯烷酮的 0.1 mol/L pH5.8 磷酸盐缓冲液, 4 °C 浸提 30 min, 然后在 4 °C、12 000 r/min 条件下离心 20 min, 收集上清液即为酶液^[19]。

1.3.7.2 脂肪氧合酶(lipoxygenase, LOX)活性测定

取 0.3 mL 预热酶液置于试管中, 加入 2 mL 预热的亚油酸底物, 混匀后放入 30 °C 水浴并开始计时, 反应 3 min 后加入 5 mL 无水乙醇终止反应, 然后加入 5 mL 蒸馏水混匀并在 234 nm 处测定吸光度, 以 1 min 内 3 mL 反应体系在 234 nm 处吸光度增加 0.001 作为一个酶活力单位(U), LOX 活性以 U/g 核桃仁表示^[20]。

1.3.7.3 多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性测定

将 0.5 mL 酶液与 2.5 mL 0.2 mol/L 邻苯二酚溶液(溶于 pH6.8、0.05 mol/L 磷酸盐缓冲液中)混合, 置于室温下反应 15 min。15 min 反应期内, 测量反应液在 410 nm 波长处的吸光度变化^[19]。以 1 min 内反应体系吸光度变化 0.001 作为一个酶活力单位(U), PPO 活性以 U/g 核桃仁表示。

1.4 数据处理与分析

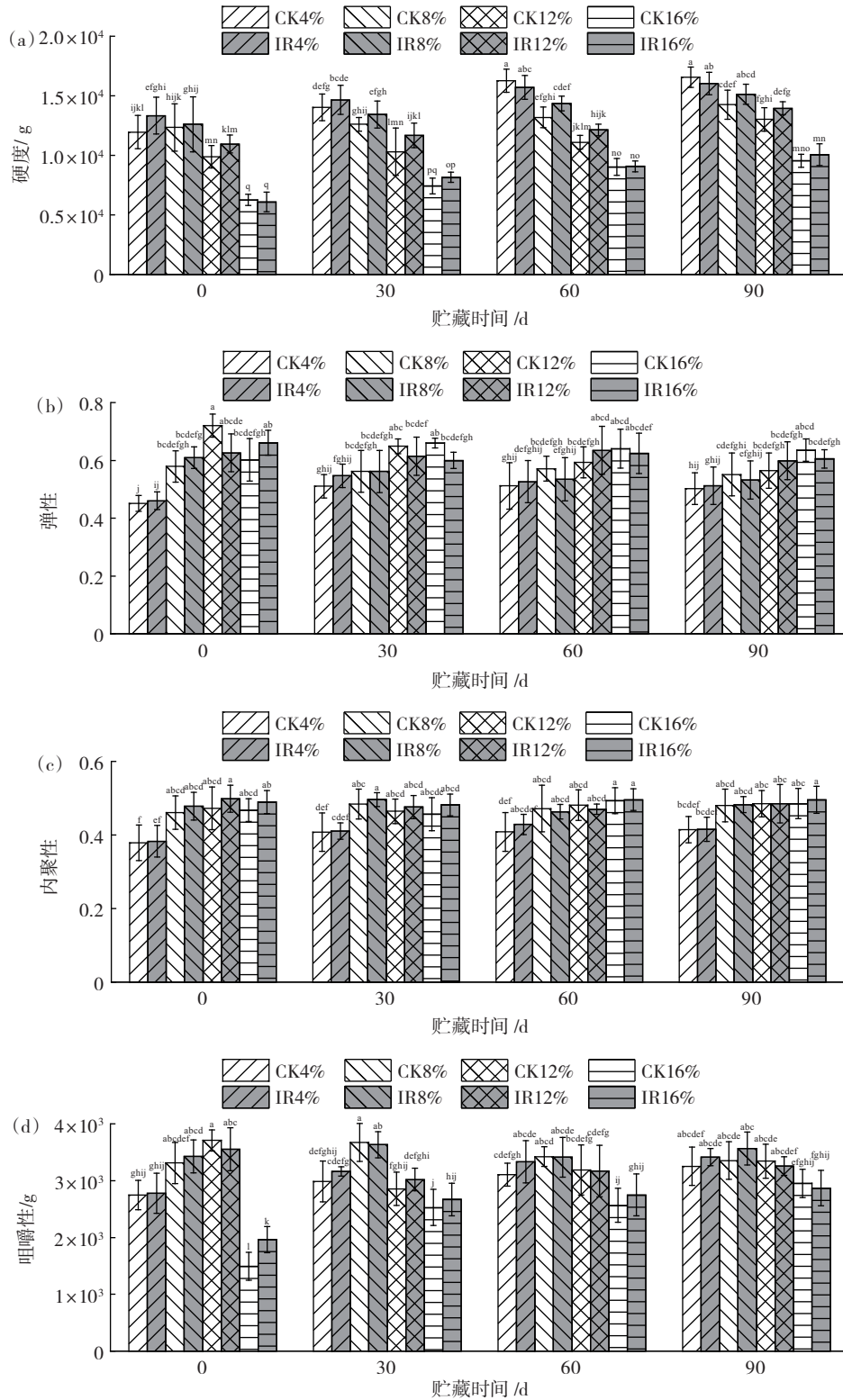
所有试验至少重复 3 次, 试验结果以平均值±标准差表示, 使用 Excel 2021 和 SPSS 25.0 对所得数据进行方差分析(analysis of variance, ANOVA)和邓肯检验($P < 0.05$), 使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 IR 预处理对偏高水分核桃质构的影响

核桃的质地是核桃品质的重要指标, 影响着消费者的购买意愿。不同含水量核桃的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性如图 1 所示。

由图 1 可知, 无论是 CK 组还是 IR 组, 随着含水量的升高, 核桃的硬度呈现下降的趋势, 弹性和内聚性整体呈现上升的趋势, 而咀嚼性呈现先上升后下降的趋势。随着贮藏时间的延长, 同一含水量核桃的硬度逐渐上升, 含水量 4% 的干制核桃的弹性整体呈现先上升后下降的趋势。经过 IR 预处理后, 相同含水量核桃的质构没有明显变化, 这表明核桃的质构变化主要是由含水量变化引起的。随着核桃中含水量的升高, 细胞开始膨胀, 细胞壁柔韧性增大, 宏观上则表现为硬度降低, 弹性增大; 并且随着含水量的增加, 有助于形成新的氢键, 提高核桃的内聚性, 这也表明核桃需要更多的能量来咀嚼, 表现为咀嚼性的提高^[21]。但是在本研究中, 含水量为 12%~16% 时, 咀嚼性反而会下降,



(a)硬度;(b)弹性;(c)内聚性;(d)咀嚼性。不同小写字母表示各处理条件下的核桃之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图1 IR 预处理对偏高水分核桃质构的影响

Fig.1 Effect of IR pretreatment on texture of walnuts with relatively higher moisture

这可能是因为含水量过高时组织细胞间结合力变弱,口腔咀嚼所需的能量减小^[22]。

2.2 IR 预处理对偏高水分核桃感官特性的影响

不同含水量核桃的感官评价如图 2 所示。

由图 2 可知,在贮藏初期(第 0 天),与 CK 组核桃颜色感官评分(7.00~7.10)和亮度感官评分(6.70~6.85)相比,IR 组核桃的颜色分数增加 7.04%~9.29%,亮度分数增加 10.22%~13.43%,风味和总接受度与颜色的趋

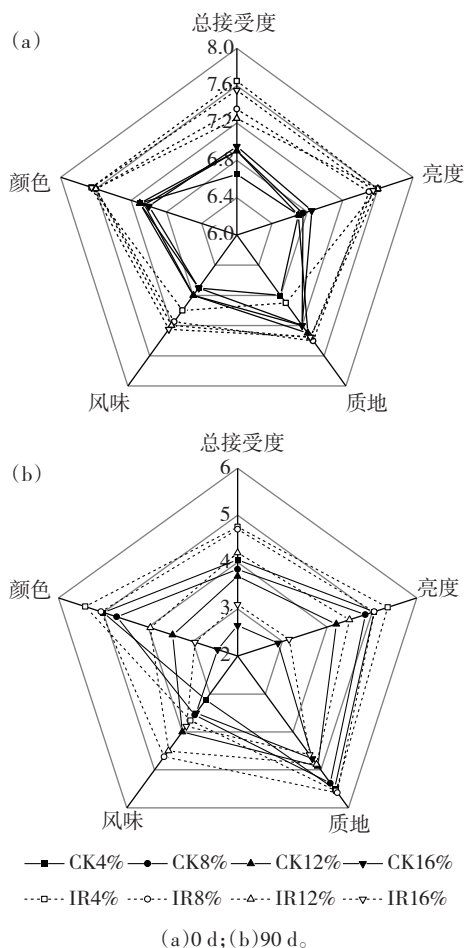


图2 核桃的感官评分

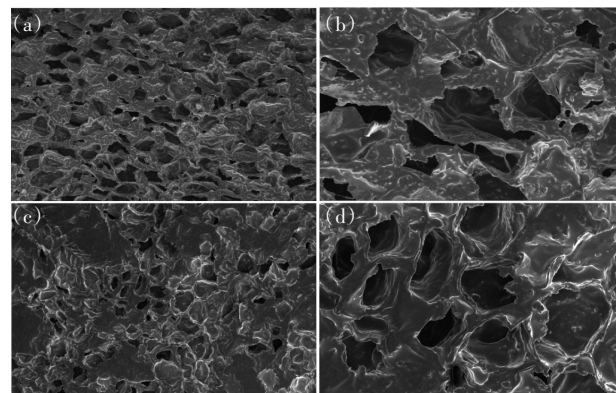
Fig.2 Sensory evaluation of walnuts

势相同;含水量主要影响核桃的质地分数,干制核桃(4%)质地分数最低,为6.80~6.90,偏高水分核桃(8%~16%)质地分数(7.20~7.35)没有明显差异,但均大于干制核桃的质地分数。贮藏90 d后,除质地分数外,所有IR组的感官评分均大于CK组,并且各感官评分均随着含水量的上升而下降。总体上,与对照组(16.20~34.80)相比,IR预处理组(17.65~37.35)核桃的感官评分明显更高,这可能是因为IR预处理使PPO与LOX活性降低,抑制了核桃的褐变与氧化。IR8%组核桃具有最好

的咀嚼性(图1),质地评分最高(图2),表明IR预处理制备的含水量8%的偏高水分核桃食用品质最好。

2.3 IR预处理对偏高水分核桃微观结构的影响

贮藏初期(0 d),IR8%偏高水分核桃与CK8%偏高水分核桃的微观结构如图3所示。



(a)、(b)分别为IR8%放大倍数300、1000;(c)、(d)分别为CK8%放大倍数300、1000。

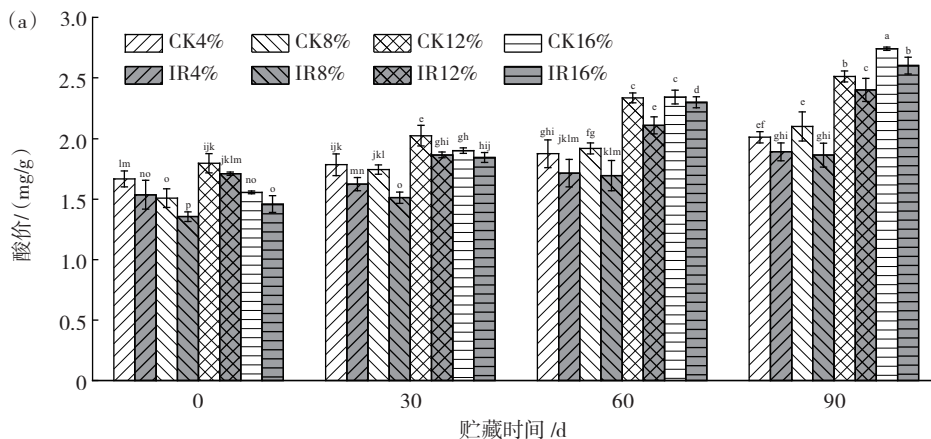
图3 核桃的微观结构

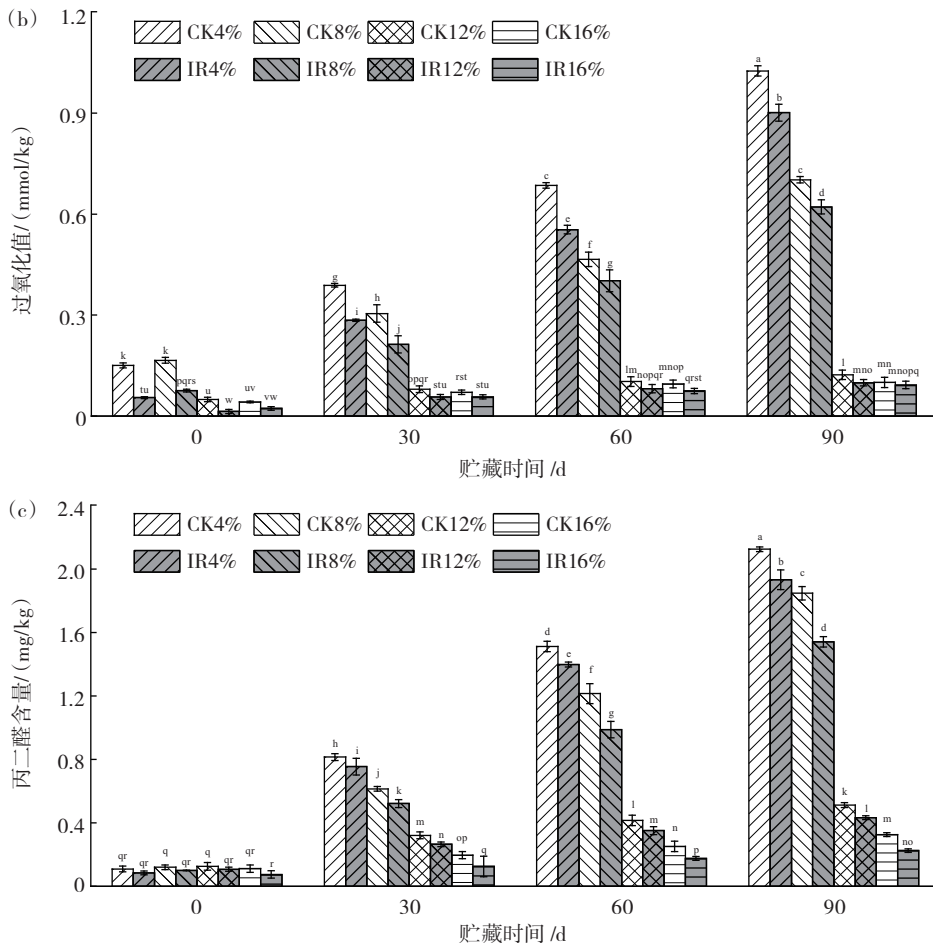
Fig.3 Microstructure of walnuts

由图3可知,两组核桃子叶组织中的细胞都有不同程度的细胞壁皱缩与油脂溢出,这可能是因为IR预处理以及热风干燥的过程中产生高温与水分流失,导致细胞中的蛋白质变性,细胞蛋白骨架被部分破坏^[23]。但是与CK8%相比,IR8%的细胞结构更加完整,并且油脂溢出较少,而CK8%大量油脂溢出,并覆盖在细胞表面,这可能是因为IR预处理使水分快速散失,缩短了后续热风干燥的时间,从而使IR8%的核桃子叶细胞蛋白骨架受损更弱。可见,IR预处理有助于核桃油体结构的维持,从而具有更高的氧化稳定性。

2.4 IR预处理延缓偏高水分核桃脂质氧化

核桃仁内部存在大量的油脂,在贮藏过程中易受温度、光等影响而发生氧化,对核桃的品质产生不良影响。酸价(acid value, AV)、过氧化值(peroxide value, POV)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)是油脂氧化劣变的代表产物,可以表征核桃氧化变质的程度,其结果如图4所示。





(a)酸价;(b)过氧化值;(c)丙二醛含量。不同小写字母表示各处理条件下的核桃之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图4 IR预处理对偏高水分核桃脂质氧化的影响

Fig.4 Effect of IR pretreatment on lipid oxidation of walnuts with relatively higher moisture

游离脂肪酸的含量以酸价表示,由图4(a)可知,在贮藏初期(0 d),对照组核桃的酸价为1.51~1.79 mg/g,而IR组核桃酸价降低了4.79%~10.15%,其中,IR8%酸价最低,为1.35 mg/g。随着贮藏时间的延长,所有核桃的酸价都不断增大,IR组的增大量小于CK组。贮藏末期,IR组的酸价(1.86~2.61 mg/g)同样低于CK组(2.01~2.74 mg/g)。贮藏期间,核桃的酸价随着其含水量的升高而升高,当含水量为12%和16%时,核桃酸价显著高于4%和8%核桃,这是因为随着含水量的升高,甘油三酯水解成游离脂肪酸的速率加快。根据GB 19300—2014《食品安全国家标准 坚果与籽类食品》,在整个贮藏期内核桃的酸价均低于3 mg/g的限定标准。

过氧化值反映着脂质过氧化物的含量,由图4(b)可知,随着贮藏时间的延长,含水量为4%和8%核桃的过氧化值快速增大,而含水量为12%和16%核桃的过氧化值缓慢增大;但是,整个贮藏期间,相同含水量的CK组核桃的过氧化值明显高于IR组核桃,与CK组核桃(0.04~0.16 mmol/kg)相比,IR组核桃的过氧化值降低了45.96%~72.48%;4%和8%核桃的过氧化值显著高

于12%和16%核桃的过氧化值。含水量高的核桃过氧化值反而上升较慢,这可能是因为过氧化物极不稳定,在生成的同时也会发生分解。在整个贮藏期内,所有核桃的过氧化值均低于2.5 mmol/kg的限定标准。

丙二醛是脂质氧化的次级氧化产物,由图4(c)可知,丙二醛含量的变化趋势与过氧化值变化趋势类似。贮藏初期,与CK组核桃(0.11~0.13 mg/kg)相比,IR组的丙二醛含量降低了14.07%~32.79%,为0.07~0.11 mg/kg,并且随着含水量的升高而下降。丙二醛是油脂氧化产生的主要醛酮类产物,具有很强的生物反应活性。在高含水量下,过氧化物与丙二醛分解的速率可能较快^[24],同时高水分含量可能阻碍了氧气与脂质的接触^[25],因此,过氧化值与丙二醛含量随含水量升高而降低。

综上,IR预处理明显延缓了核桃在贮藏期的脂质氧化,偏高水分核桃(IR8%)的脂质氧化能够被控制在限定范围内。

2.5 IR预处理延长偏高水分核桃货架期

基于核桃贮藏过程中酸价的变化,使用一级动力

学方程进行回归分析,得到核桃的酸价动力学模型,如表 1 所示。

由表 1 可知,所有组别核桃酸价的一级动力学回归模型的 R^2 值均大于 0.9,表明方程具有较好的拟合精度。从回归方程可以看出,经过 IR 预处理后,酸价的变化速率降低,说明 IR 预处理对核桃脂质氧化劣变的抑制作用。根据 GB 19300—2014《食品安全国家标准 坚果与籽类食品》中的规定,当核桃的酸价低于 3 mg/g 时,其品质是可以接受的,根据此临界值,可以计算出所有组别核桃的货架期(表 1),对于偏高水分核桃(8%),经过 IR 预处理后,其货架期延长了 25%。

2.6 IR 预处理抑制偏高水分核桃多酚氧化性

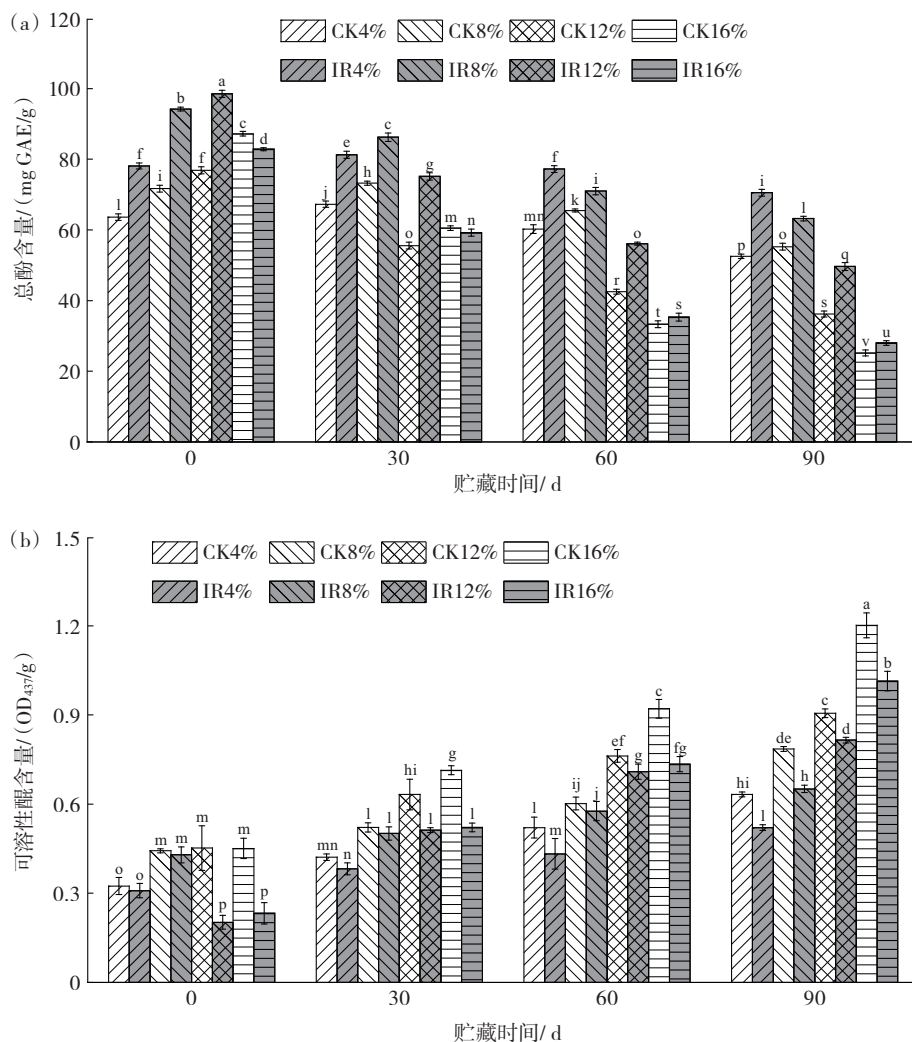
所有组别核桃的总酚与可溶性鞣含量如图 5 所示。

表 1 基于酸价的一级动力学方程与货架期预测

Table 1 First-order kinetic equations and shelf-life prediction based on acid value

样品	回归方程	R^2	货架期预测值/d
CK4%	$y=1.668 2e^{0.002 1x}$	0.995 9	280
IR4%	$y=1.537 1e^{0.002 1x}$	0.987 7	318
CK8%	$y=1.508 9e^{0.003 9x}$	0.986 1	176
IR8%	$y=1.355 8e^{0.003 6x}$	0.998 5	221
CK12%	$y=1.788 4e^{0.004 0x}$	0.983 8	129
IR12%	$y=1.712 3e^{0.003 6x}$	0.992 5	156
CK16%	$y=1.557 3e^{0.006 5x}$	0.995 3	101
IR16%	$y=1.479 9e^{0.006 5x}$	0.994 7	108

注:回归方程中 y 表示酸价,mg/g; x 表示贮藏时间,d。



(a)总酚含量;(b)可溶性鞣含量。不同小写字母表示各处理条件下的核桃之间具有显著性差异($P<0.05$)。

图 5 IR 预处理对偏高水分核桃多酚氧化的影响

Fig.5 Effect of IR pretreatment on polyphenol oxidation of walnuts with relatively higher moisture

多酚在植物中广泛分布,是植物响应环境胁迫的代谢产物,对核桃的营养品质亦起着重要作用^[26]。由图 5(a)可知,整个贮藏期,除 IR16% 核桃外,相同含水量的其他 IR 组核桃的总酚含量(78.08~98.52 mg GAE/g)

显著高于 CK 组核桃的总酚含量(63.64~76.85 mg GAE/g) ($P<0.05$),提高了 22.70%~31.37%,这表明 IR 预处理可以促进酚类化合物的释放。IR 预处理提高菊花^[27]、碧根果^[13]酚类化合物也已经报道。贮藏初期,

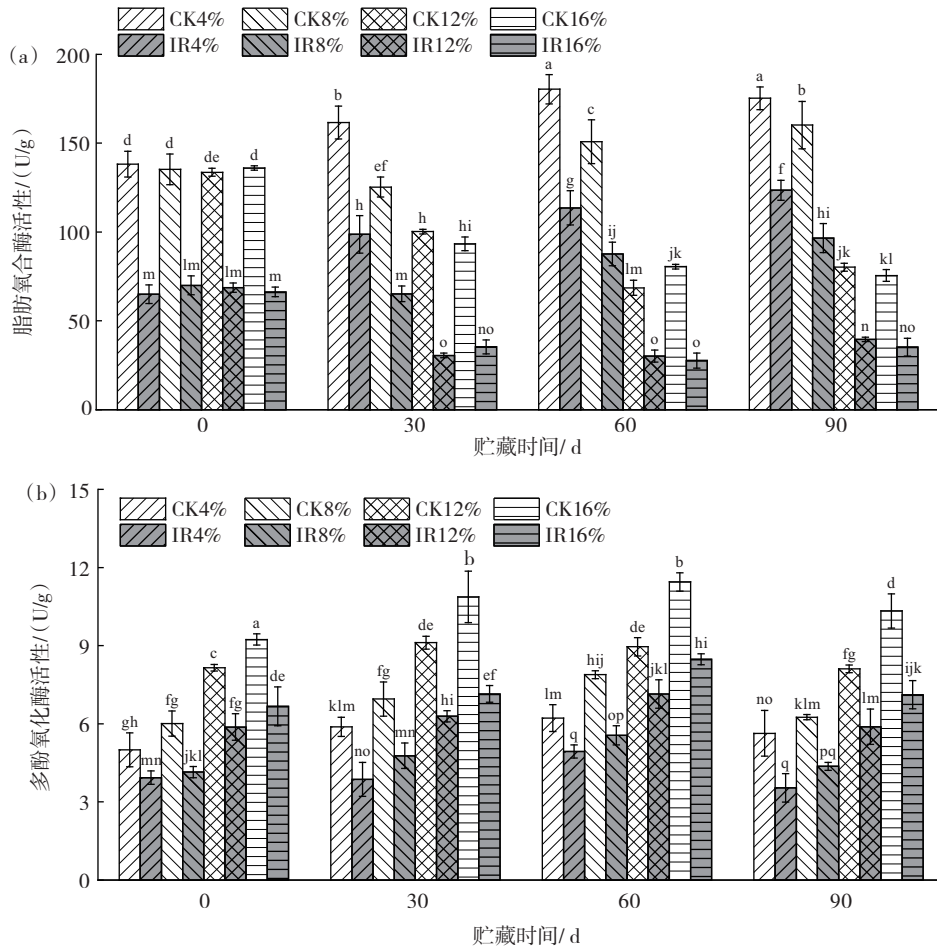
CK 组核桃总酚含量随着含水量的增加而增加,但是, IR 组核桃总酚含量随着含水量的增加而增加,12%含水量时达到最大值(98.52 mg GAE/g),含水量继续增大到 16% 时,IR16% 总酚含量下降。随着贮藏时间的延长,4% 核桃和 8% 核桃的总酚含量降低速率低于 12% 核桃和 16% 核桃,这表明高含水量加速了多酚的降解。

醌是多酚氧化产生的高反应活性的中间产物,可以与多酚、氨基酸等物质继续反应生成色素,影响品质^[28]。由图 5(b)可知,整个贮藏期,相同含水量的所有 IR 组核桃的可溶性醌含量(0.20~1.01 OD₄₃₇/g)显著

低于 CK 组核桃的可溶性醌含量(0.32~1.20 OD₄₃₇/g)($P<0.05$);同时,随着贮藏时间的延长,所有核桃可溶性醌含量都增大,但是,4% 核桃和 8% 核桃的可溶性醌含量降低速率低于 12% 核桃和 16% 核桃,这可能与高含水量促进总酚水解与氧化有关。

综上,IR 预处理可以提高促进核桃中酚类物质的释放、抑制可溶性醌的生成,同时,IR4% 干制核桃、IR8% 偏高水分核桃的多酚保留量比含水量为 12% 和 16% 核桃的多酚保留量更高。

2.7 IR 预处理抑制偏高水分核桃 LOX 和 PPO 活性
所有组别核桃的 LOX 与 PPO 活性如图 6 所示。



(a)脂肪氧化酶活性;(b)多酚氧化酶活性。不同小写字母表示各处理条件下的核桃之间具有显著性差异($P<0.05$)。

图 6 IR 预处理对偏高水分核桃酶活性的影响

Fig.6 Effect of IR pretreatment on enzyme activities of walnuts with relatively higher moisture

LOX 是核桃脂质酶促氧化劣变的重要酶类,并且会导致核桃产生异味。由图 6(a)可知,在整个贮藏期,所有相同含水量的 IR 组核桃的 LOX 活性(27.7~123.5 U/g)明显低于 CK 组核桃(68.6~180.3 U/g),表明 IR 预处理的钝酶效应,IR 预处理抑制碧根果 LOX 活力也有报道^[13]。贮藏初期,不同含水量 CK 组核桃的 LOX 活性(133.6~136.0 U/g)没有显著差异($P>0.05$),不同含水量 IR 组核桃的 LOX 活性(65.0~70.0 U/g)也

没有显著差异($P>0.05$),但随着贮藏时间的延长,含水量为 12% 和 16% 核桃的 LOX 活性显著低于 IR4% 干制核桃、IR8% 偏高水分核桃的 LOX 活性,与前文中核桃过氧化值与丙二醛含量的变化规律类似,这可能是因为低含水量下核桃水的单层膜包围的大分子变得不连续,LOX 更易于脂质接触^[29],进而发生氧化。

PPO 是核桃在贮藏过程中导致酶促褐变的主要酶类。由图 6(b)可知,与 IR 预处理对 LOX 的抑制作用

相似,在整个贮藏期,所有相同含水量的 IR 组核桃的 PPO 活性(3.5~8.5 U/g)都显著低于 CK 组核桃(5.0~11.4 U/g),表明 IR 预处理也抑制 PPO 的活性,这可能与 IR 预处理的热效应与非热效应破坏 PPO 的结构而使其失活有关^[30]。随着贮藏时间的延长,所有核桃的 PPO 活性呈现先上升后下降趋势,第 60 天达到最大值(4.9~11.4 U/g)。含水量对核桃 PPO 活性存在明显的影响,PPO 活性随着含水量的降低而降低。周新群等^[31]也发现脱水处理可以降低紫薯的 PPO 活性。

3 结论

IR 预处理 2 min 再热风干燥是制备硬度较低、贮藏品质较好的偏高水分核桃的有效措施。IR 预处理通过抑制偏高水分核桃的脂氧合酶、多酚氧化酶的活性,抑制脂质氧化,减少游离脂肪酸、过氧化物与丙二醛的生成;并且通过抑制多酚氧化,提高总酚含量,减少可溶性鞣的生成,抑制色泽劣变。8% 含水量核桃不仅具有更好的质构与口感,而且具有一定的货架期,这可能与 IR 预处理促进酚类物质溶出及抑制脂氧合酶和多酚氧化酶活性有关。本研究结果为偏高水分核桃的加工与利用提供了一定的理论支持。

参考文献:

- [1] WU M X, WANG P, ZHU F, et al. Postharvest drying of walnuts: Effect of drying methods on walnut quality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115565.
- [2] WANG P, ZHONG L L, YANG H B, et al. Comprehensive comparative analysis of lipid profile in dried and fresh walnut kernels by UHPLC-Q-Exactive Orbitrap/MS[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132706.
- [3] ADKISON C, RICHMOND K, LINGGA N, et al. Optimizing walnut storage conditions: Effects of relative humidity, temperature, and shelling on quality after storage[J]. HortScience, 2021, 56(10): 1244-1250.
- [4] 杨狄芯,练银银,杨宇航,等.鲜核桃与不同方式干制核桃的品质差异研究[J].食品与发酵工业,2023:1-12.
YANG Dixinxin, LIAN Yinyin, YANG Yuhang, et al. Effects of drying on quality and flavor of walnut kernels[J]. Food and Fermentation Industries, 2023: 1-12.
- [5] 曲文娟,凡威,曹非凡,等.核桃的变温滚筒催化红外-热风联合干燥研究[J].现代食品科技,2021,37(7):137-147,175.
QU Wenjuan, FAN Wei, CAO Feifan, et al. Walnut drying by combined drum catalytic infrared with a variable temperature and hot air[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 137-147, 175.
- [6] GAMA T, WALLACE H M, TRUEMAN S J, et al. Quality and shelf life of tree nuts: A review[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 242: 116-126.
- [7] 耿阳阳,张彦雄,胡译文,等.鲜食核桃研究进展[J].食品工业科技,2016,37(16):396-399.
GENG Yangyang, ZHANG Yanxiong, HU Yiwen, et al. Research progress of fresh walnuts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(16): 396-399.
- [8] 王竞.电子束辐照对鲜食核桃品质的影响[D].天津:天津科技大学,2022.
WANG Jing. Effect of electron beam irradiation on quality of fresh walnut[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.
- [9] HUANG D, YANG P, TANG X H, et al. Application of infrared radiation in the drying of food products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 765-777.
- [10] 马海乐,陈文庆.基于电磁波和等离子体的固态食品新兴物理杀菌技术研究现状与展望[J].食品科学技术学报,2023,41(4):1-15.
MA Haile, CHEN Wenqing. Research status and prospect of emerging physical sterilization technology of solid food based on electromagnetic wave and plasma[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(4): 1-15.
- [11] VENKITASAMY C, BRANDL M T, WANG B N, et al. Drying and decontamination of raw pistachios with sequential infrared drying, tempering and hot air drying[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 246: 85-91.
- [12] ATUNGULU G G, EAN TEH H, WANG T X, et al. Infrared pre-drying and dry-dehulling of walnuts for improved processing efficiency and product quality[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(6): 961-971.
- [13] LUO S Z, SUN Y, YUAN X, et al. Infrared radiation blanching-inhibited browning and extended shelf life of pecan kernels[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(4): 1566-1579.
- [14] 孙焯.红外-热风干燥对碧根果品质及贮藏稳定性的影响研究[D].合肥:合肥工业大学,2023.
SUN Ye. Effects of infrared-hot air drying on quality and storage stability of pecans[D]. Hefei: Heifei University of Technology, 2023.
- [15] 孙席平,孔娜,许铭强,等.低压静磁场处理对鲜食核桃解冻效果及货架期品质的影响[J].新疆农业科学,2023,60(6):1506-1514.
SUN Xiping, KONG Na, XU Mingqiang, et al. Effects of low-pressure static magnetic field treatments on defrosting and shelf life quality of fresh walnuts[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(6): 1506-1514.
- [16] ERFANI A, KHALIL PIROUZIFARD M, ALMASI H, et al. Application of cellulose plate modified with encapsulated *Cinnamomum zelanicum* essential oil in active packaging of walnut kernel[J]. Food Chemistry, 2022, 381: 132246.
- [17] ZHANG Z S, JIA H J, LI X D, et al. Effect of drying methods on the quality of tiger nuts (*Cyperus esculents* L.) and its oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 167: 113827.
- [18] GAO F H, XIE W Y, ZHANG H, et al. Metabolomic analysis of browning mechanisms of morels (*Morchella sextelata*) during storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 185: 111801.
- [19] WANG W J, JUNG J, MCGORRIN R J, et al. Investigation of drying conditions on bioactive compounds, lipid oxidation, and enzyme activity of Oregon hazelnuts (*Corylus avellana* L.)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 90: 526-534.
- [20] 钟芳,王璋,许时婴.3种脂肪氧合酶酶活测定方法[J].无锡轻工大学学报,2001,20(1):77-80,91.
ZHONG Fang, WANG Zhang, XU Shiyong. Comparison of three different methods for determination of lipoxygenase activity[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2001, 20(1): 77-80, 91.
- [21] PRABHAKAR H, KERR W L, BOCK C H, et al. Effect of relative humidity, storage days, and packaging on pecan kernel texture: Analyses and modeling[J]. Journal of Texture Studies, 2023, 54(1): 115-126.
- [22] 王纪辉,耿阳阳,刘亚娜,等.基于低场核磁共振技术探究不同

- 水分含量对熟化板栗品质的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(4): 769-780.
- WANG Jihui, GENG Yangyang, LIU Yana, et al. Effects of different moisture content on the quality of processed chestnut(*Castanea mollissima*) based on low-field nuclear magnetic resonance technology[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(4): 769-780.
- [23] BAI Y P, ZHOU H M, ZHU K R, et al. Effect of thermal treatment on the physicochemical, ultrastructural and nutritional characteristics of whole grain highland barley[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128657.
- [24] 李文娟, 郜海燕, 陶菲, 等. 贮藏温度和物料初始含水量对山核桃油脂氧化及类脂褐素生成的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(5): 62-70.
- LI Wenjuan, GAO Haiyan, TAO Fei, et al. Effects of storage temperature and initial moisture content on oil oxidation and lipofuscin-like pigments accumulation of walnut (*Carya cathayensis*)[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(5): 62-70.
- [25] TAVAKOLIPOUR H, MOKHTARIAN M, KALBASI-ASHTARI A. Lipid oxidation kinetics of pistachio powder during different storage conditions[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(3): e12423.
- [26] FENG M, XU B G, NAHIDUL ISLAM M, et al. Individual and synergistic effect of multi-frequency ultrasound and electro-infrared pretreatments on polyphenol accumulation and drying characteristics of edible roses[J]. Food Research International, 2023, 163: 112120.
- [27] XU H H, WU M, WANG Y, et al. Effect of combined infrared and hot air drying strategies on the quality of *Chrysanthemum morifolium* Ramat.) cakes: Drying behavior, aroma profiles and phenolic compounds[J]. Foods, 2022, 11(15): 2240.
- [28] GENG Y Q, LIU X Y, YU Y R, et al. From polyphenol to o-quinone: Occurrence, significance, and intervention strategies in foods and health implications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 3254-3291.
- [29] LI W J, GAO H Y, FANG X J, et al. Accumulation of lipofuscin-like pigments of walnuts (*Carya cathayensis*) during storage: Potential roles of lipid oxidation and non - enzymatic glycosylation[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(12): 2505-2513.
- [30] 张琥, 王金勇. 红外与漂烫处理下马铃薯多酚氧化酶的失活机理研究[J]. 食品工业, 2017, 38(2): 9-13.
- ZHANG Hu, WANG Jinyong. Study on inactivation mechanism of potato PPO under infrared processing and blanching processing[J]. The Food Industry, 2017, 38(2): 9-13.
- [31] 周新群, 冯欣欣, 孙洁, 等. 脱水预处理对冷冻紫薯花色苷损失的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 32-41.
- ZHOU Xinqun, FENG Xinxin, SUN Jie, et al. Effect of dehydration pretreatment on the loss of anthocyanins in frozen purple sweet potato[J]. Food Science, 2023, 44(13): 32-41.

责任编辑:王艳
收稿日期:2024-04-17