

王一峰, 胡文斌, 陈耀年, 等. 不同干燥方法对核桃贮藏过程中内种皮褐变的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(4): 764-775.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.04.015

# 不同干燥方法对核桃贮藏过程中内种皮褐变的影响

王一峰<sup>1</sup>, 胡文斌<sup>1</sup>, 陈耀年<sup>1</sup>, 赵淑玲<sup>1</sup>, 王明霞<sup>2</sup>

(1. 陇南师范学院农林技术学院, 甘肃 成县 742500; 2. 成县核桃科技服务中心, 甘肃 成县 742500)

**摘要:** 为探讨干燥方法对核桃贮藏过程中内种皮褐变的影响, 为核桃贮藏过程中内种皮褐变调控提供理论依据, 本研究以核桃品种清香为试验材料, 采用自然晒干(CK)、热风干燥(T1)、真空干燥(T2)及真空变温干燥(T3) 4种干燥方法处理, 测定贮藏过程中核桃仁外观及内种皮褐变指标变化, 并采用通径分析法分析影响核桃内种皮褐变的主要因素。结果表明: 随着贮藏时间的延长, 各处理核桃仁颜色逐渐加深, 褐变度增加, 与CK相比, T2、T3处理核桃仁颜色较浅、褐变度较小; 相对电导率和丙二醛(MDA)含量随贮藏时间延长逐渐增加, CK增幅最大, T2、T3处理增幅较小; 核桃内种皮总酚含量在贮藏30 d时均有所下降, 贮藏60 d时有所升高, 贮藏90 d时又开始下降, 但上升和下降的幅度都不大, 整个贮藏期间核桃内种皮总酚含量维持较高水平, 与CK相比, T2、T3处理核桃内种皮总酚含量总体较高; 核桃内种皮多酚氧化酶(PPO)、超氧化物歧化酶(SOD)、Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性均呈先升后降的趋势, 与CK相比, T2、T3处理核桃内种皮SOD、Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性总体较高, PPO活性总体较低; 核桃内种皮过氧化物酶(POD)活性整体呈下降趋势, 与CK相比, T2、T3处理核桃内种皮POD活性总体较高; 过氧化氢酶(CAT)、脂氧合酶(LOX)活性均呈上升趋势, 与CK相比, T2、T3处理CAT活性较高, LOX活性较低。通径分析结果表明: 不同干燥方法处理的核桃在贮藏过程中影响核桃褐变的主要因素不同, PPO、POD及Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性是影响CK核桃褐变的主要因素; 总酚含量、CAT活性、Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性是影响T1处理核桃褐变的主要因素; SOD、POD、Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性是影响T2处理核桃褐变的主要因素; 总酚含量、POD活性、Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性是影响T3处理核桃褐变的主要因素。

**关键词:** 核桃; 内种皮; 干燥方法; 贮藏; 褐变

**中图分类号:** S664.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)04-0764-12

## Effects of different drying methods on browning of walnut endotesta during storage

WANG Yifeng<sup>1</sup>, HU Wenbin<sup>1</sup>, CHEN Yaonian<sup>1</sup>, ZHAO Shuling<sup>1</sup>, WANG Mingxia<sup>2</sup>

(1. Technique College of Agriculture and Forestry, Longnan Normal University, Chengxian 742500, China; 2. Chengxian Walnut Science and Technology Service Center, Chengxian 742500, China)

**Abstract:** To investigate the impact of drying methods on the browning of the endotesta during walnut storage and to provide a theoretical basis for the control of endotesta browning during walnut storage, this study used the walnut variety

收稿日期: 2024-05-09

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(22JR5RK1049); 甘肃省高校教师创新基金项目(2024B-333); 甘肃省高等学校创新创业教育改革项目[甘教高函(2023)14号]; 甘肃省大学生就业创业能力提升工程项目[甘教学函(2023)29号]

作者简介: 王一峰(1986-), 男, 甘肃礼县人, 硕士, 副教授, 研究方向为植物生理生态。(E-mail) wangyifeng0305@163.com

“Qingxiang” as the experimental material. Four drying methods were employed: natural sun-drying (CK), hot-air drying (T1), vacuum drying (T2), and variable-temperature vacuum drying (T3). During storage, changes in the appearance of the kernel and browning indices of the endotesta were measured. Path analysis was used to identify the main factors affecting endotesta browning in walnuts. The results indicated that with the extension of storage

time, the color of the kernels in all treatments gradually darkened and the degree of browning increased. Compared with CK, the kernels in T2 and T3 treatments had lighter color and lower degree of browning. The relative electrical conductivity and the content of malondialdehyde (MDA) gradually increased with the extension of storage time. The increase was the highest in CK, while the increments in T2 and T3 treatments were relatively smaller. The total phenolic content in the walnut endotesta decreased at 30 days of storage, increased at 60 days, and then decreased again at 90 days. However, the magnitude of these increases and decreases was not significant. Throughout the storage period, the total phenolic content in the walnut endotesta remained at a relatively high level. Compared with CK, the total phenolic content in the endotesta of walnuts in T2 and T3 was generally higher. The activities of polyphenol oxidase (*PPO*), superoxide dismutase (*SOD*) and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase in walnut endotesta increased first and then decreased. Compared with CK, the activities of *SOD* and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase in walnut endotesta under T2 and T3 treatments were generally higher, and the activity of *PPO* was generally lower. The peroxidase (*POD*) activity of walnut endotesta showed a downward trend as a whole. Compared with CK, the *POD* activity of walnut endotesta in T2 and T3 treatments was generally higher. The activities of catalase (*CAT*) and lipoxygenase (*LOX*) showed an upward trend. Compared with CK, the activity of *CAT* was higher and the activity of *LOX* was lower in T2 and T3 treatments. The path analysis results indicated that different drying methods had different effects on walnut browning during storage. For walnuts in the CK, the main factors influencing browning were the activities of *PPO*, *POD*, and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase. For walnuts in T1 treatment, the main factors influencing browning were the total phenolic content, *CAT* activity, and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase activity. For walnuts in T2 treatment, the main factors influencing browning were the activities of *SOD*, *POD*, and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase. For walnuts in T3 treatment, the main factors influencing browning were the total phenolic content, *POD* activity, and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase activity.

**Key words:** walnut; endotesta; drying methods; storage; browning

核桃是世界四大干果之一<sup>[1]</sup>,因其核仁富含营养物质和具有一定的保健、美容及药用价值而被大量种植和消费<sup>[2]</sup>。核桃在中国栽培历史悠久,分布广泛,已形成西北、西南、华中和东南沿海栽培区域。近年来,核桃种植面积及产量逐年攀升,对其采后商品化处理和贮藏提出了新的要求。核桃果实在采后贮藏期间品质会下降,表现在外观、色泽等方面,可能会出现褐变、裂果等现象,其中褐变问题是影响其品质的最重要因素。褐变是果实发生的生理失调现象,其发生原因众多,如果实衰老、机械损伤、环境胁迫、能量匮乏等,而且往往是多种原因共同造成的<sup>[3]</sup>。目前,普遍认为褐变包括酶促褐变和非酶促褐变,核桃贮藏过程中发生的褐变多为酶促褐变。底物酚类和氧化酶区域分布学说是当前最为认可的酶促褐变机制之一,当细胞区室化丧失,底物酚类会与酶结合生成黑色物质,进而造成褐变<sup>[4]</sup>。核桃内种皮含有丰富的酚类物质(核桃内种皮多酚含量远高于核仁)<sup>[5]</sup>,对富含脂肪的种胚起到了关键保护作用,核桃在贮藏过程中内种皮褐变逐渐加重,使得种胚失去保护,导致油脂酸败和蛋白质氧化损伤,从而降低核仁品质,且种皮颜色是评价核桃商品最直观的品质指标。因此,褐变不仅影响核桃的口感和风味,而且会降低其营养品质和商品价值,贮藏期间,核桃内种皮褐变的控制已

成为核桃采后处理和贮藏的关键技术。

干燥是保持农产品良好品质的常见方法之一,不同干燥方法、不同温度以及氧气环境会导致机体内小分子发生不同的不可逆变化,如膜结构破裂引起酶促褐变,美拉德反应以及过氧化等,都是色泽发生变化的原因<sup>[6]</sup>。研究发现,通过干燥使含水量降至8%以下,可防止微生物繁殖和不良化学反应,能延长农产品的贮藏时间<sup>[7]</sup>。同时,通过干燥降低核仁含水量,会抑制酶促反应和氧化反应相关酶活性,利于保持核仁色泽<sup>[8]</sup>。自然晒干和热风干燥是目前常见的核桃干燥方法,自然晒干耗费时间较长,且受天气限制,干燥后核桃产品的品质无法保障;热风干燥是通过45℃左右的热风逐渐带走核桃内部水分使核桃含水量降低,与自然晒干法相比耗时较短,但存在容易氧化及热损伤造成营养损失和品质下降的不足<sup>[9]</sup>。除此之外,还有远红外干燥、真空干燥、变温干燥等干燥方法,其中真空干燥作为新型的干燥方法,适用于对氧气和温度敏感的物料。目前关于农产品褐变机理及抑制褐变的研究大多集中在新鲜果蔬的保鲜方面,关于农产品干燥方法的研究也多集中在不同干燥方法对农产品营养品质的影响,关于干燥方法对核桃等坚果贮藏过程中褐变的影响研究鲜有报道。基于此,本研究以核桃品种清香为

试验材料,参照前人的研究结果及方法,设置自然晒干、热风干燥、真空干燥及真空变温干燥等不同干燥方法,研究不同干燥方法对核桃贮藏过程中核仁颜色、内种皮褐变度及褐变相关生理指标的影响,以期为核桃褐变调控研究及核桃采后处理和高品质贮藏技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用核桃采自甘肃省成县大路沟国家核桃良种基地,品种为清香。于 2023 年 9 月 15 日,选择 10 年生健壮的核桃树,从树的东、西、南、北 4 个方向采集生长状态一致、自然成熟、无病虫害的核桃青果,迅速带回实验室备用。

### 1.2 试验仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱(上海冉绘实业有限公司产品):型号为 DHG-9146A,消耗功率 2 000 W,容积为 450 mm×550 mm×550 mm。真空干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司产品):型号为 DZF-6053,消耗功率 1 450 W,容积为 415 mm×370 mm×345 mm。真空泵(临海市谭氏真空设备有限公司产品):型号为 2xz-15c,消耗功率 1 500 W。

### 1.3 试验设计

将核桃青果人工脱青皮后随机分成 4 组(4 个处理),各处理设 3 个重复,每个重复 120 粒核桃坚果。将第 1 组核桃坚果自然晒干作为对照(CK),干燥终点含水率为 9.92%;第 2 组采用热风干燥法(T1):将核桃坚果置于 40 °C 鼓风干燥箱中干燥 30 h,干燥期间每隔 2 h 翻动 1 次,干燥终点含水率为 9.63%;第 3 组采用真空干燥法(T2):将核桃坚果置于真空干燥箱中(真空度 -0.1 MPa)40 °C 恒温干燥 30 h,干燥期间每隔 2 h 翻动 1 次,干燥终点含水率为 9.74%;第 4 组采用真空变温干燥法(T3):将核桃坚果装真空干燥箱中(真空度 -0.1 MPa)35 °C 持续 5 h,然后 50 °C 持续 13 h,最后 30 °C 持续 18 h,干燥期间每隔 2 h 翻动 1 次,干燥终点含水率为 9.58%。

### 1.4 指标测定

于干燥处理完当天每个重复各取 30 粒坚果作为试验开始时的样品。剩余的样品置人工气候箱(温度 25 °C,光照周期为白天 16 h、黑夜 8 h)加速贮藏,每隔 30 d 取 1 次样,直至第 90 d。每次取样后,脱去果壳取出核仁,除用于外观颜色观察及相对电导率测定的

样品外,其余核仁用蒸馏水浸泡 40 min 剥离内种皮,将内种皮用液氮研磨成粉末,置于 -80 °C 冰箱中。

1.4.1 核仁外观 取完整半仁,用佳能 IXUS 240 相机拍照记录不同干燥方法处理的核桃贮藏期间外观颜色的变化。

1.4.2 褐变相关指标测定 褐变度的测定参照陈佳妮等<sup>[10]</sup>的方法,称取核桃内种皮粉末 2 g,加 10 mL 95%乙醇,4 000 g 离心 20 min,取上清液在 420 nm 处测定吸光度值,以  $A_{420} \times 10$  表示褐变度;相对电导率的测定采用电导仪法<sup>[2]</sup>;丙二醛含量的测定采用硫代巴比妥酸法<sup>[11]</sup>;总酚含量的测定采用福林酚比色法<sup>[12]</sup>;SOD、CAT、POD 活性测定参考 Ma 等<sup>[13]</sup>的方法;PPO 活性参考郑龙<sup>[14]</sup>的方法;LOX 活性、 $\text{Na}^+ \text{K}^+$ -ATP 酶活性测定按照对应试剂盒的操作说明完成,试剂盒购自北京索莱宝生物科技有限公司,LOX 活性测定试剂盒货号为 YA0602, $\text{Na}^+ \text{K}^+$ -ATP 酶活性测定试剂盒货号为 YA0602。

### 1.5 数据处理与分析

以相对电导率( $x_1$ )、丙二醛含量( $x_2$ )、总酚含量( $x_3$ )、PPO 活性( $x_4$ )、SOD 活性( $x_5$ )、CAT 活性( $x_6$ )、POD 活性( $x_7$ )、LOX 活性( $x_8$ )、ATP 酶活性( $x_9$ )为自变量,以褐变度为因变量( $Y$ ),对引起核桃内种皮褐变的各因素进行路径分析,求出直接通径系数  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ... $P_9$ ,按公式(1)计算各因素间的间接通径系数  $P_{ij}$ ;由相关系数和通径系数计算决定系数( $d$ )<sup>[15]</sup>;按公式(2)、(3)计算单个因素( $i$ )、2 个因素( $i$ 、 $j$ )对  $Y$  的决定系数;按公式(4)计算剩余通径系数( $P_e$ )。

$$P_{ij} = r_{ij} P_j \quad (1)$$

$$d_i = P_i^2 \quad (2)$$

$$d_{ij} = 2r_{ij} P_i P_j \quad (3)$$

$$P_e = \sqrt{1 - \sum d} \quad (4)$$

所有指标的数据均重复测定 3 次,用 IBM SPSS23 软件进行多重比较以及指标间的相关性分析及路径分析,用 Origin 2022 软件绘图。

## 2 结果与分析

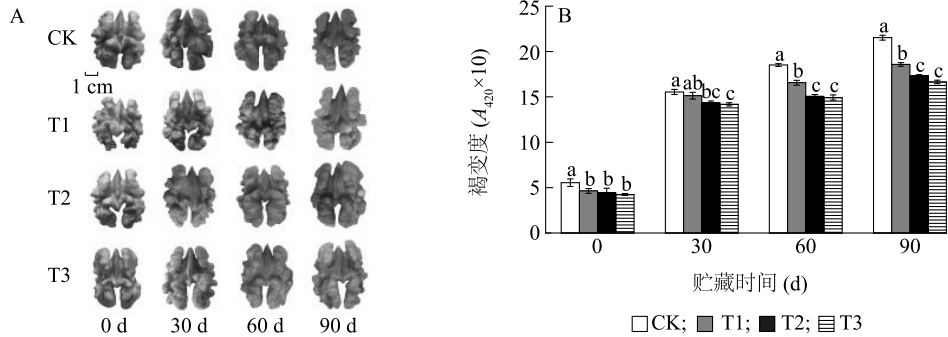
### 2.1 不同干燥方法对核桃内种皮颜色、褐变度的影响

由图 1A 可知:随着贮藏时间的延长,各处理核桃内种皮颜色均逐渐加深,其中 CK 的颜色变化最严重,贮藏 30 d 便从浅黄色变为棕色;其次是 T1 处理,贮藏 30 d 部分变为棕色,贮藏 60 d 全部变为棕

色;T2 处理贮藏90 d变为棕色;T3 处理在贮藏过程中核桃内种皮颜色变化最小。

由图 1B 可知,随着贮藏时间的延长,各处理核桃内种皮褐变度均增加,且在0~30 d增加幅度最大(平均增幅 215.99%);在整个贮藏过程中,CK 核桃内种皮褐

变度始终大于其他处理,且与其他处理(除贮藏30 d热风干燥处理外)差异显著( $P < 0.05$ )。贮藏结束(90 d)时,T3 处理的褐变度最低(16.65),较 CK(21.53)降低了 4.88;其次是 T2 处理(17.34),较 CK 降低了 4.19;T1 处理的褐变度为 18.58,较 CK 降低了 2.95。



A: 颜色变化;B: 褐变度。CK: 自然晒干;T1: 热风干燥法;T2: 真空干燥法;T3: 真空变温干燥法。同一贮藏时间不同图柱上不同小写字母表示处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 1 不同干燥方法对核桃内种皮颜色和褐变度的影响

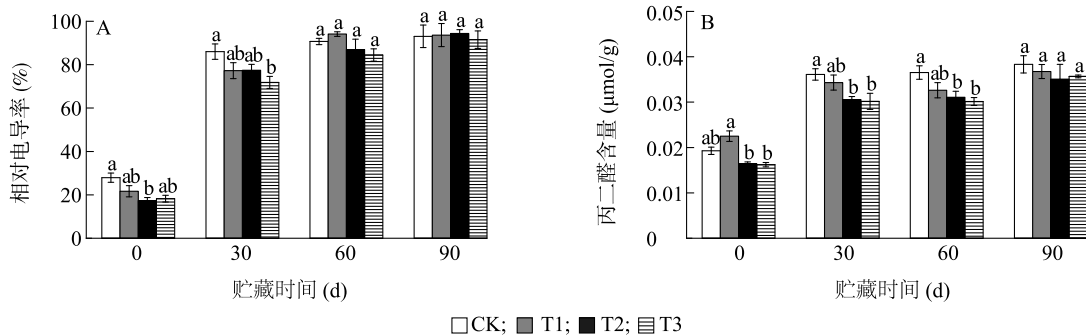
Fig.1 Effects of different drying methods on the color and browning degree of walnut endotesta

### 2.2 不同干燥方法对核桃内种皮相对电导率、丙二醛含量的影响

由图 2A 可知,贮藏30 d内,各处理核桃内种皮相对电导率均显著增加,其中 CK 核桃内种皮相对电导率较大,T1、T2、T3 处理的相对电导率较小;贮藏30 d后各处理核桃内种皮相对电导率增加幅度均不大,且不同处理间的相对电导率差异不显著( $P > 0.05$ )。

由图 2B 可知,随着贮藏时间的延长,各处理核

桃内种皮 MDA 含量总体呈增加趋势,但不同处理的增加幅度不同,CK 和 T1 处理核桃内种皮 MDA 含量增加较快,T2、T3 处理核桃内种皮 MDA 含量增加较慢;贮藏初期(0 d),T1 处理核桃内种皮 MDA 含量最高(0.023  $\mu\text{mol/g}$ ),且与 T2、T3 处理差异显著( $P < 0.05$ );贮藏30~60 d,CK 核桃内种皮 MDA 含量均高于 T2、T3 处理,T2、T3 处理核桃内种皮 MDA 含量较低。



A: 相对电导率;B: 丙二醛含量。CK、T1、T2、T3 见图 1 注。同一贮藏时间不同图柱上不同小写字母表示处理之间差异显著( $P < 0.05$ )。

图 2 不同干燥方法对核桃内种皮相对电导率和丙二醛含量的影响

Fig.2 Effects of different drying methods on relative electrical conductivity and malondialdehyde content of walnut endotesta

### 2.3 不同干燥方法对核桃内种皮总酚含量和 PPO 活性的影响

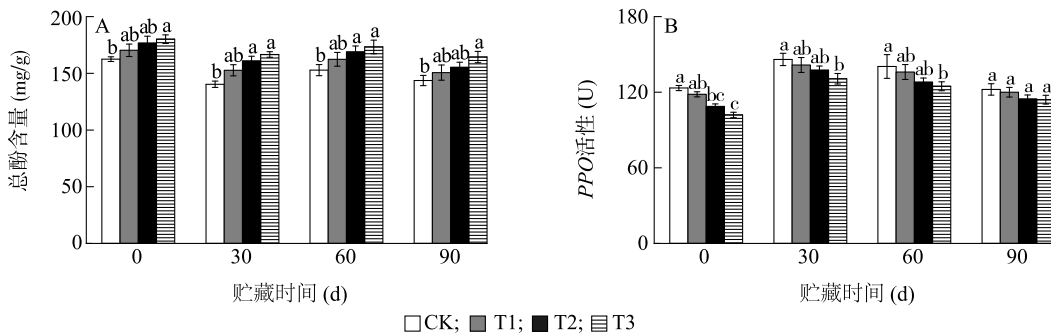
由图 3A 可知,贮藏初期(0 d)T3 处理核桃内种

皮总酚含量最高(180.08  $\text{mg/g}$ ),且与 CK(162.49  $\text{mg/g}$ )差异显著( $P < 0.05$ ),T1、T2 处理核桃内种皮总酚含量高于 CK,但与 CK 差异不显著( $P > 0.05$ );

贮藏30 d,各处理核桃内种皮总酚含量均有所下降,其中降幅最大的是CK,下降了13.63%,降幅最小的是T3处理,下降了7.48%;贮藏60 d,各处理核桃内种皮总酚含量又有所增加,但是增加幅度不大(平均增幅为6.69%);整个贮藏过程中,T2处理和T3处理核桃内种皮总酚含量均保持在相对稳定的状态,贮藏结束时(90 d),各处理核桃内种皮总酚含量均有所下降,但T2处理和T3处理下降幅度较小,仍然保持了较高的总酚含量(T2处理为155.33 mg/g、

T3处理为164.35 mg/g)。

由图3B可知,在整个贮藏过程中,各处理核桃内种皮PPO活性均表现为先上升后下降的趋势。贮藏30 d各处理核桃内种皮PPO活性均达到了峰值,其中最高的是CK(145.99 U)、其次是T1处理(141.64 U),T3处理最小(130.67 U);贮藏90 d,各处理核桃内种皮PPO活性均有所降低,且不同处理间差异不显著( $P>0.05$ )。



A:总酚含量;B:PPO活性。CK、T1、T2、T3 见图1注。同一贮藏时间不同柱图上不同小写字母表示处理之间差异显著( $P<0.05$ )。

图3 不同干燥方法对核桃内种皮总酚含量和多酚氧化酶(PPO)活性的影响

Fig.3 Effects of different drying methods on total phenolic content and polyphenol oxidase (PPO) activity of walnut endotesta

#### 2.4 不同干燥方法对核桃内种皮SOD、CAT、POD活性的影响

SOD、CAT和POD是植物抗氧化酶系统重要的3种酶<sup>[16]</sup>。由图4A可知,随着贮藏时间的延长,各处理核桃内种皮SOD活性均呈现先升后降的趋势,其中CK和T1处理在贮藏30 d时出现了峰值(分别为504 U和485 U),T2处理和T3处理在贮藏60 d时出现峰值(分别为506.91 U和512.66 U);在贮藏初期(0 d),CK核桃内种皮SOD活性显著低于其他处理( $P<0.05$ );贮藏30 d内,所有处理核桃内种皮SOD活性迅速增加,其中CK的增长最快(从0 d的353.56 U增加到30 d的504.47 U);贮藏后期(60~90 d),各处理核桃内种皮SOD活性均呈现出下降趋势,且始终表现为T3处理核桃内种皮SOD活性最高,其次是T2处理,CK核桃内种皮SOD活性最低。由图4B可知,在整个贮藏期间,各处理核桃内种皮CAT活性整体呈上升趋势,且在贮藏0~30 d上升较快,在30~60 d上升较慢,60 d后又快速上升;整个贮藏期间,CK核桃内种皮CAT活性均较低,贮藏30 d T3处理核桃内种皮CAT活性高于其他处理,但与T2处

理差异不显著。由图4C可知,在整个贮藏期间,各处理核桃内种皮POD活性整体呈下降趋势,其中贮藏的0~30 d下降幅度较大(平均下降幅度为13.85%),30~60 d下降幅度较小(平均降幅为6.51%),60~90 d又开始迅速下降,贮藏结束(90 d)时,T3、T2处理核桃内种皮POD活性分别为294.81 U和288.36 U,显著高于其他处理。

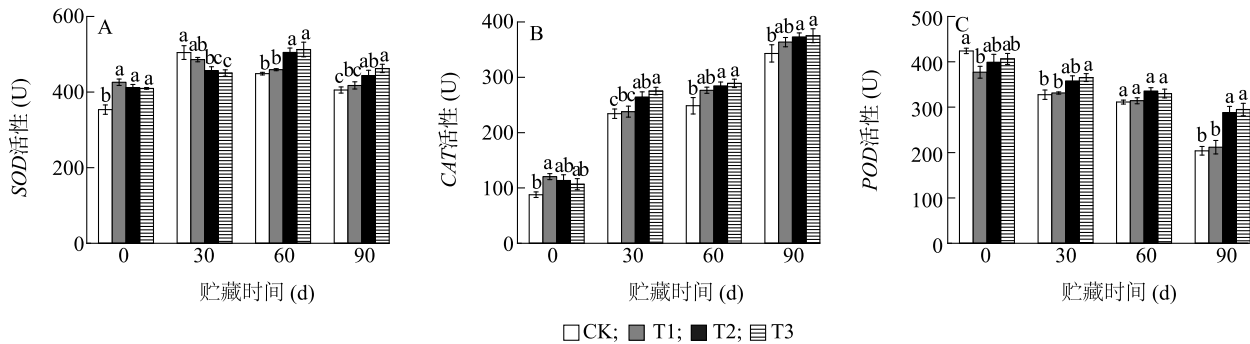
#### 2.5 不同干燥方法对核桃内种皮LOX、Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性的影响

如图5A所示,随着贮藏时间的延长,各处理核桃内种皮LOX活性整体呈上升趋势,在贮藏0~30 d上升较快,30 d后上升速度变慢;在贮藏初期(0 d),CK核桃内种皮LOX活性显著低于其他处理( $P<0.05$ ),T1处理核桃内种皮LOX活性最高且与其他处理差异显著( $P<0.05$ );贮藏30 d,CK核桃内种皮LOX活性高于其他处理;整个贮藏过程中,T3处理和T2处理核桃内种皮保持相对较低的LOX活性。

如图5B所示,各处理的Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性在贮藏期间整体呈先升后降的趋势。贮藏初期(0 d),不同处理间的Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶活性差异不显著( $P>0.05$ );贮藏30 d时各处理核桃内种皮Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶

活性均达到最大值(CK 为 2.24 U、T1 处理为 2.32 U、T2 处理为 2.61 U、T3 处理为 2.65 U),之后开始下降;贮藏 30 d 后,不同处理间核桃内种皮  $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP 酶活性存在差异,总体表现为 T3 处理和

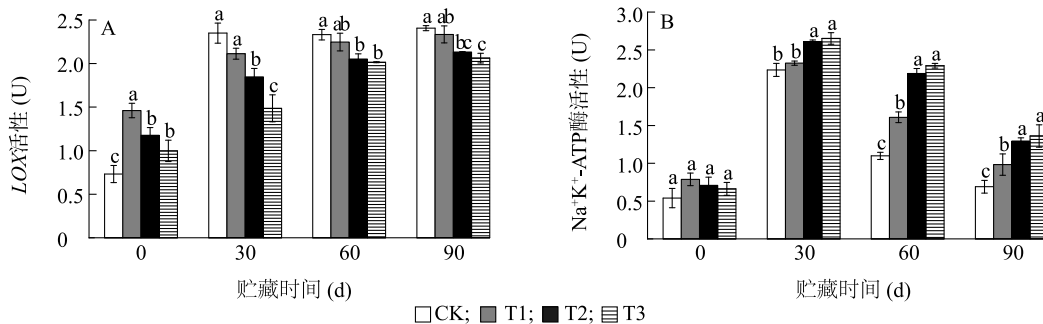
T2 处理核桃内种皮  $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP 酶活性较高且与其他处理差异显著 ( $P < 0.05$ ),T1 处理核桃内种皮  $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP 酶活性居中,CK 核桃内种皮  $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP 酶活性最低。



A: SOD 活性; B: CAT 活性; C: POD 活性。CK、T1、T2、T3 见图 1 注。同一贮藏时间不同图柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 4 不同干燥方法对核桃内种皮超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 活性的影响

Fig.4 Effects of different drying methods on the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) in walnut endotesta



A: LOX 活性; B: ATP 酶活性。CK、T1、T2、T3 见图 1 注。同一贮藏时间不同图柱上不同小写字母表示处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 5 不同干燥方法对核桃内种皮脂氧合酶 (LOX)、 $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP 酶活性的影响

Fig.5 Effects of different drying methods on the activities of lipoxigenase (LOX) and  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase in walnut endotesta

## 2.6 不同干燥方法处理的核桃内种皮褐变的相关性分析

为了分析核桃品种清香在贮藏过程中褐变相关指标间的相关性,采用 Pearson 相关性分析法对 4 种干燥方法处理的核桃在贮藏 0~90 d 10 个指标间的相关性进行了分析(表 1)。由表 1 可知,各处理的相对电导率( $x_1$ )、丙二醛含量( $x_2$ )均与褐变度( $Y$ )呈显著或极显著正相关,其中 CK、T1 处理褐变度( $Y$ )与相对电导率( $x_1$ )、丙二醛含量( $x_2$ )呈显著正相关( $P < 0.05$ ),T2 处理褐变度( $Y$ )与相对电导率( $x_1$ )、丙二醛含量( $x_2$ )呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),T3 处理褐变度( $Y$ )与相对电导率( $x_1$ )呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与

丙二醛含量( $x_2$ )呈显著正相关( $P < 0.05$ );PPO 活性( $x_4$ )、SOD 活性( $x_5$ )、 $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP 酶活性( $x_9$ )均与褐变度( $Y$ )呈正相关,但相关性不显著( $P > 0.05$ );总酚含量( $x_3$ )、POD 活性( $x_7$ )均与褐变度( $Y$ )呈负相关,但相关性不显著( $P > 0.05$ );CAT 活性( $x_6$ )在 CK、T2 处理、T3 处理中均与褐变度( $Y$ )呈显著正相关( $P < 0.05$ ),在 T1 处理中与褐变度( $Y$ )呈正相关,但相关性不显著( $P > 0.05$ );LOX 活性( $x_8$ )在 T1 处理中与褐变度( $Y$ )呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),在 CK、T2 处理中与褐变度( $Y$ )呈显著正相关( $P < 0.05$ ),在 T3 处理中与褐变度( $Y$ )呈正相关,但相关性不显著( $P > 0.05$ )。

表 1 贮藏期间核桃内种皮各指标的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of walnut endotesta indices during storage

干燥方法	指标	指标									Y	
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$		
CK	$x_1$	1.000										0.971 *
	$x_2$	0.999 **	1.000									0.973 *
	$x_3$	-0.961 *	-0.969 *	1.000								-0.906
	$x_4$	0.741	0.729	-0.775	1.000							0.560
	$x_5$	0.727	0.721	-0.802	0.988 *	1.000						0.544
	$x_6$	0.914	0.926	-0.879	0.422	0.432	1.000					0.976 *
	$x_7$	-0.828	-0.844	0.792	-0.257	-0.274	-0.984 *	1.000				-0.927
	$x_8$	0.998 **	0.999 **	-0.975 *	0.764	0.758	0.905	-0.816	1.000			0.960 *
	$x_9$	0.459	0.459	-0.608	0.888	0.934	0.157	-0.007	0.504	1.000		0.245
T1	$x_1$	1.000										0.984 *
	$x_2$	0.972 *	1.000									0.983 *
	$x_3$	-0.808	-0.919	1.000								-0.839
	$x_4$	0.649	0.549	-0.417	1.000							0.508
	$x_5$	0.396	0.300	-0.227	0.954 *	1.000						0.235
	$x_6$	0.879	0.920	-0.816	0.211	-0.080	1.000					0.949
	$x_7$	-0.685	-0.783	0.766	0.089	0.358	-0.947	1.000				-0.802
	$x_8$	0.986 *	0.974 *	-0.811	0.514	0.238	0.944	-0.788	1.000			0.999 **
	$x_9$	0.560	0.499	-0.452	0.976 *	0.972 *	0.126	0.141	0.416	1.000		0.420
T2	$x_1$	1.000										0.993 **
	$x_2$	0.988 *	1.000									0.999 **
	$x_3$	-0.842	-0.891	1.000								-0.870
	$x_4$	0.502	0.368	-0.228	1.000							0.394
	$x_5$	0.690	0.603	-0.190	0.596	1.000						0.640
	$x_6$	0.941	0.982 *	-0.904	0.188	0.503	1.000					0.975 *
	$x_7$	-0.842	-0.913	0.846	0.044	-0.403	-0.972 *	1.000				-0.901
	$x_8$	0.980 *	0.984 *	-0.800	0.356	0.713	0.964 *	-0.905	1.000			0.990 *
	$x_9$	0.696	0.578	-0.388	0.967 *	0.738	0.415	-0.199	0.580	1.000		0.604
T3	$x_1$	1.000										0.992 **
	$x_2$	0.967 *	1.000									0.986 *
	$x_3$	-0.883	-0.921	1.000								-0.875
	$x_4$	0.633	0.418	-0.423	1.000							0.336
	$x_5$	0.735	0.657	-0.343	0.517	1.000						0.754
	$x_6$	0.946	0.997 **	-0.903	0.347	0.656	1.000					0.975 *
	$x_7$	-0.829	-0.926	0.753	-0.111	-0.686	-0.953 *	1.000				-0.893
	$x_8$	0.862	0.902	-0.665	0.271	0.855	0.921	-0.964 *	1.000			0.914
	$x_9$	0.753	0.561	-0.522	0.983 *	0.641	0.499	-0.286	0.441	1.000		0.673

CK、T1、T2、T3 见图 1 注。 $x_1$ : 相对电导率;  $x_2$ : 丙二醛含量;  $x_3$ : 总酚含量;  $x_4$ : PPO 活性;  $x_5$ : SOD 活性;  $x_6$ : CAT 活性;  $x_7$ : POD 活性;  $x_8$ : LOX 活性;  $x_9$ :  $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP 酶活性; Y: 褐变度。\* 表示相关性显著 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示相关性极显著 ( $P < 0.01$ )。

### 2.7 不同干燥方法处理的核桃内种皮褐变的途径分析

各因素间的相关系数只能表明两因素间的直接关系及相关程度,但不能完全确定各因素对核桃内种皮褐变的相对重要性。为进一步探讨影响不同干燥方法处理的核桃内种皮褐变的主要因素,对其进行途径分析,根据途径系数分析各因素的相对重要性。其中  $P_i$  为直接途径系数,反映因素  $x_i$  对褐变度 ( $Y$ ) 的直接效应;  $P_{ij}$  为间接途径系数,反映因素  $x_i$  通过  $x_j (i \neq j)$  对  $Y$  的作用。

由表 2 可知,CK 处理  $PPO$  活性 ( $x_4$ )、 $POD$  活性 ( $x_7$ ) 及  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性 ( $x_9$ ) 与核桃内种皮褐变度显著相关,其中对褐变度起首要作用的是  $PPO$  活性 ( $P_4 = 0.745$ ),且呈正向影响的作用,其次是  $POD$  活性 ( $P_7 = -0.689$ ),再次是  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性 ( $P_9 = -0.406$ );另外, $Na^+K^+$ -ATP 酶活性和  $PPO$  活性的交互作用对褐变度产生的间接影响也较明显。T1 处理总酚含量 ( $x_3$ )、 $CAT$  活性 ( $x_6$ ) 及  $Na^+K^+$ -ATP 酶活

性 ( $x_9$ ) 显著影响核桃内种皮褐变度,其中  $CAT$  活性对褐变度的影响最强 ( $P_6 = 1.063$ ),其次是  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性 ( $P_9 = 0.375$ ),再次是总酚含量 ( $P_3 = 0.197$ );另外,总酚含量通过  $CAT$  活性对褐变度的影响明显 ( $P_{3,6} = -0.867$ )。T2 处理  $SOD$  活性 ( $x_5$ )、 $POD$  活性 ( $x_7$ )、 $Na^+K^+$ -ATP 酶活性 ( $x_9$ ) 对核桃内种皮褐变度具有显著影响,其中  $POD$  活性对褐变度的影响最强 ( $P_7 = -0.822$ ),其次是  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性 ( $P_9 = 0.467$ ),再次是  $SOD$  活性 ( $P_5 = -0.036$ ); $SOD$  活性通过其他因素对褐变度的影响也较明显。T3 处理总酚含量 ( $x_3$ )、 $POD$  活性 ( $x_7$ ) 及  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性 ( $x_9$ ) 对核桃内种皮褐变度具有显著影响,其中  $POD$  活性对褐变度的影响最大 ( $P_7 = -0.637$ ),其次是  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性 ( $P_9 = 0.391$ ),再次是总酚含量 ( $P_3 = -0.192$ ),另外,总酚含量通过  $POD$  活性对褐变度的影响较为明显 ( $P_{3,7} = -0.479$ )。

表 2 不同干燥方法处理的核桃内种皮褐变指标途径分析

Table 2 Path analysis of browning indices in the endotesta of walnuts treated by different drying methods

干燥方法	指标	指标					
		$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_9$
CK	$x_4$		0.745 <sup>a</sup>			0.177	-0.361
	$x_7$		-0.191			-0.689 <sup>a</sup>	0.003
	$x_9$		0.662			0.005	-0.406 <sup>a</sup>
T1	$x_3$	0.197 <sup>a</sup>			-0.867		-0.169
	$x_6$	-0.161			1.063 <sup>a</sup>		0.047
	$x_9$	-0.089			0.134		0.375 <sup>a</sup>
T2	$x_5$			-0.036 <sup>a</sup>		0.331	0.345
	$x_7$			0.015		-0.822 <sup>a</sup>	0.093
	$x_9$			-0.027		0.176	0.467 <sup>a</sup>
T3	$x_3$	-0.192 <sup>a</sup>				-0.479	-0.204
	$x_7$	-0.145				-0.637 <sup>a</sup>	-0.112
	$x_9$	0.100				0.182	0.391 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>表示该数据为直接途径系数 ( $P_i$ ),其余数据为间接途径系数 ( $P_{ij}$ )。CK、T1、T2、T3 见图 1 注。 $x_3 \sim x_9$  见表 1 注。

不同干燥方法处理的核桃内种皮褐变决定系数如表 3 所示。将不同处理各因素对褐变度的决定系数按绝对值大小排序结果表明:在 CK 中, $PPO$  活性是影响其褐变的第一因素 ( $d_4 = 0.555$ ), $PPO$  和  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性的交互作用是影响其褐变的第二因素 ( $d_{4,9} = -0.478$ ), $POD$  活性是影响其褐变的第

三因素 ( $d_7 = 0.475$ );在 T1 处理中, $CAT$  活性是影响其褐变的第一因素 ( $d_6 = 1.129$ ),其他因素对褐变的影响较小;在 T2、T3 处理中, $POD$  活性是影响其褐变的主要因素,其他因素对褐变的影响较小。另外,CK 中  $P_e = 0.152$ ,表明影响 CK 中核桃内种皮褐变的因素除了  $PPO$  活性、 $POD$  活性、 $Na^+K^+$ -ATP 酶活

性及它们之间的交互作用外,还存在其他因素;T1、T2、T3 处理中  $P_e$  均很小,表明其余影响褐变的因素已基本不考虑。

表 3 不同干燥方法处理的核桃内种皮褐变的决定系数

Table 3 Determination coefficients of walnut endotesta browning treated by different drying methods

决定系数	干燥方法			
	CK	T1	T2	T3
$d_3$		0.039		0.037
$d_4$	0.555			
$d_5$			0.001	
$d_6$		1.129		
$d_7$	0.475		0.676	0.406
$d_9$	0.165	0.141	0.218	0.153
$d_{3,6}$		-0.342		
$d_{3,7}$				0.184
$d_{3,9}$		-0.067		0.078
$d_{4,7}$	0.264			
$d_{4,9}$	-0.478			
$d_{5,7}$			-0.024	
$d_{5,9}$			-0.025	
$d_{6,7}$				
$d_{6,9}$		0.100		
$d_{7,9}$	-0.004		0.153	0.142
$\Sigma d$	0.977	1.000	0.999	1.000
$P_e$	0.152	0	0.032	0

CK、T1、T2、T3 见图 1。 $P_e$ : 剩余通径系数。

### 3 讨论与结论

农产品色泽的形成与多种因素有关,除自身含有的有色物质形成底色外,还与外界环境的变化有关。本研究中,随着贮藏时间的延长,各处理核桃仁的颜色均发生了加深变化,但是加深的程度不同,其中自然晒干(CK)的核桃仁颜色变化较快且加深较重,真空变温干燥(T3 处理)和真空干燥(T2 处理)的核桃仁颜色变化较慢,且加深较轻;核桃内种皮褐变度测定结果显示,在贮藏过程中,自然晒干(CK)的褐变度显著高于其他干燥方法,真空变温干燥(T3 处理)和真空干燥(T2 处理)的核桃内种皮褐变度显著低于其他干燥方法。该结果表明不同干燥方法处理的核桃在贮藏过程中内种皮褐变程度不同,通径分析结

果也表明,不同干燥方法会改变核桃贮藏过程中影响内种皮褐变的主要因素,进而影响褐变程度。

丙二醛是植物细胞膜脂过氧化的产物,可与核酸或氨基酸残基作用进而降低细胞膜的稳定性,导致电解质外渗使得细胞液导电性增加。因此,MDA 含量和相对电导率可以作为评价植物细胞膜脂过氧化程度的重要指标<sup>[17]</sup>,同时也是评价植物衰老进程的重要参数<sup>[18]</sup>。本研究中,随着贮藏时间的延长,各处理的 MDA 含量和相对电导率都呈上升趋势,其中在贮藏 30 d 内上升幅度最大,贮藏 30 d 后上升幅度较小,表明核桃坚果在加速贮藏的 30 d 内细胞膜损伤程度较重,这可能是由于这一阶段氧化作用较强造成的。另外,贮藏 30 d、60 d、T3 处理的 MDA 含量和相对电导率均较 CK 低,表明真空干燥和变温干燥能减轻植物细胞膜的损伤,这可能是因为真空干燥隔绝了氧气,且变温干燥前期干燥温度较低,后期高温干燥时间较短,总受热时间较短,可能延缓了核桃氧化<sup>[10]</sup>。

引起果实褐变的因素众多,其中 PPO 催化引起的酚类物质氧化被认为是引起褐变的重要因素<sup>[19]</sup>。核桃内种皮含有丰富的酚类物质,一方面酚类物质具有较强的抗氧化活性,能够保护核仁免受脂肪酸的氧化作用<sup>[5]</sup>,保护核仁质量,另一方面,酚类物质会作为酶促褐变的底物,在 PPO 的催化下被氧化而引起褐变<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,在贮藏的前 30 d,各处理核桃内种皮总酚含量均呈下降趋势,而 PPO 活性在贮藏的前 30 d 呈上升趋势,可能是贮藏的前 30 d 内由 PPO 的催化引起的酶促褐变较为严重,降低了酚类物质的含量,随着贮藏时间的延长,PPO 活性表现为先升高后下降的趋势,可能是由于贮藏期间随着酶促褐变产物的积累抑制了 PPO 活性<sup>[21]</sup>。在整个贮藏过程中,T3 处理总酚含量显著高于 CK,而 PPO 活性在贮藏 30~60 d 显著低于 CK,表明真空变温干燥能维持核桃贮藏过程中较高水平的多酚含量,同时能减缓 PPO 参与的酶促褐变,进而能减轻褐变。通径分析结果显示,在 CK 中,PPO 活性是影响核桃内种皮褐变的第一因素,在 T1、T2、T3 处理中 PPO 活性不是影响核桃内种皮褐变的第一因素,这一研究结果表明,与 CK 相比,其他干燥方法可以减缓 PPO 催化引起的褐变。

SOD、CAT 及 POD 是植物组织膜保护系统中十分重要的酶,在植物组织干燥过程中与组织褐变有

密切的关系<sup>[22]</sup>。褐变的发生会加速植物衰老,产生的活性氧不能及时清理在体内积累进而对细胞造成伤害。本研究中贮藏前期,各处理的 *SOD* 活性均迅速上升,可能是由于前期膜脂氧化作用较强,产生的活性氧较多,贮藏后期,各处理的 *SOD* 活性又开始下降,可能是随着贮藏时间的延长,细胞老化破坏严重导致 *SOD* 活性下降<sup>[23]</sup>,其中 CK 和 T1 处理在贮藏 60 d 后 *SOD* 活性下降较快,T2、T3 处理 *SOD* 活性下降较慢,贮藏 90 d T2、T3 处理 *SOD* 活性高于 CK 和 T1 处理,表明真空干燥和真空变温干燥时核桃内种皮能通过维持较高的 *SOD* 活性有效控制膜脂的氧化作用。各处理的 *CAT* 活性在贮藏过程中整体呈上升趋势,但在贮藏 0~30 d 上升速度较快,30~60 d 上升速度较慢,60~90 d 又快速上升,可能是由于贮藏初期发生氧化作用产生活性氧,引起抗氧化系统的应激反应而使得 *CAT* 活性快速上升,随着活性氧的积累,超过了 *CAT* 活性响应的“阈值”,而使得 *CAT* 活性上升变慢<sup>[24]</sup>,在整个抗氧化系统稳定后 *CAT* 活性又开始升高<sup>[25]</sup>。*POD* 广泛存在于植物组织中,且活性较强,是一种含血红素的氧化还原酶,能够清除细胞过氧化产生的  $H_2O_2$ ,在植物生长发育和抗逆防御中具有重要作用,同时,在  $H_2O_2$  存在下可催化酚类物质氧化造成组织的褐变<sup>[26]</sup>。本研究中,随着贮藏时间的延长,各处理 *POD* 活性总体呈下降趋势,通径分析结果表明 *POD* 活性对褐变度的影响较强,表明在核桃贮藏过程中 *POD* 主要通过清除  $H_2O_2$  而提高抗氧化能力,进而起到延缓衰老的作用。也有研究表明 *POD* 活性与褐变的关系与植物品种有关<sup>[27]</sup>。

核仁富含脂肪酸,脂肪酸的氧化是核仁贮藏过程中变质的主要原因<sup>[28]</sup>,脂氧合酶(*LOX*)是一类含非血红素铁的蛋白,广泛存在于植物组织中,与植物的成熟衰老密切相关<sup>[29]</sup>,是膜脂代谢的关键酶,主要通过诱导磷脂水解和不饱和脂肪酸氧化而引起细胞代谢紊乱,从而导致细胞功能衰退<sup>[30]</sup>,已有研究表明 *LOX* 活性与果实的褐变有关<sup>[31-33]</sup>。本研究表明,在整个贮藏过程中,各处理的 *LOX* 活性均呈上升趋势,且贮藏的前 30 d 上升速度较快,30 d 后上升速度变慢,表明贮藏前期脂类的氧化作用较强,30 d 后氧化作用变弱。相关性分析结果表明 CK、T1 处理、T2 处理核桃内种皮褐变度与 *LOX* 活性呈显著或极显著正相关,表明在核桃贮藏过程

中,由 *LOX* 引起的脂类氧化作用是引起褐变的主要原因。

能量供应在控制果实衰老和果实采后生理失调起到重要作用,ATP 酶作为能量代谢和调节 ATP 合成的关键酶,在果实褐变调控中起到重要作用,其活性的下降会造成细胞能量亏损,引起褐变<sup>[34]</sup>。本研究通径分析结果表明,4 种干燥方法处理的核桃褐变度均与  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性显著相关,表明不同干燥方法处理的核桃在贮藏过程中的褐变均与能量代谢有关。另外,有研究结果表明自由基对  $Na^+K^+$ -ATP 酶具有一定的损伤作用,当细胞膜过氧化作用增强时, $Na^+K^+$ -ATP 酶活性会显著降低<sup>[35]</sup>。本研究中,随着贮藏时间的延长各处理的  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性呈先上升后下降的趋势,可能是由于前期的膜脂过氧化作用导致细胞结构受损,机体启动修复机制,需要 ATP 供能,因此 ATP 酶活性相应增加,随着贮藏时间的延长,氧化作用增强产生的自由基大量积累对 ATP 酶造成了损伤导致其活性下降。在贮藏过程中,T2、T3 处理  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性高于对照,且 *SOD*、*CAT*、*POD* 活性也高于对照,表明真空干燥和真空变温干燥能减轻核桃贮藏过程中的膜脂过氧化作用,提高  $Na^+K^+$ -ATP 酶活性,进而延缓褐变。

本试验中,通径分析结果显示,不同干燥方法处理的核桃影响其褐变的主要因素不同。在 CK 中,*PPO* 活性、*POD* 活性与核桃内种皮褐变显著相关,是影响内种皮褐变的主要因素,*PPO* 是酶促褐变的主要酶,*POD* 在有  $H_2O_2$  存在时也能催化多酚氧化,因此,这可能说明经过自然晒干的核桃在贮藏过程中内种皮褐变主要是酶促褐变引起的。T1 处理中总酚含量、*CAT* 活性是影响褐变的主要因素,多酚具有较强的抗氧化能力,是天然的抗氧化剂,*CAT* 是重要的抗氧化酶,且有研究表明 *SOD* 是抗氧化系统的第一道屏障,会首先清除自由基,同时会产生  $H_2O_2$  的积累,再由 *CAT*、*APX* 等酶清除  $H_2O_2$ ,从而减少活性氧的积累<sup>[36]</sup>,由此推测,经过热风干燥的核桃在贮藏过程中内种皮褐变主要是膜脂过氧化引起的,且过氧化较为严重。T2 处理中 *SOD* 活性、*POD* 活性对核桃内种皮褐变具有显著影响,是影响内种皮褐变的主要因素,表明真空干燥的核桃在贮藏过程中内种皮褐变是膜脂过氧化作用引起的,但过氧化作用较轻。T3 处理中总酚含量、*POD* 活性对核桃

内种皮褐变具有显著影响,是影响内种皮褐变的主要因素,表明真空变温干燥的核桃在贮藏过程中内种皮褐变是过氧化引起的,但过氧化作用较轻。另外,所有干燥方法处理的核桃在贮藏过程中 $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP酶活性均对内种皮褐变具有显著影响,说明能量匮乏是造成干制核桃在贮藏过程中褐变的重要原因。

此外,核桃采后干燥处理中,能量的消耗也是生产实践中考虑的重要因素。本试验中相较自然晒干法,其他3种干燥方法都有电能消耗,其中热风干燥因其只有加热装置,耗电较少(能耗为每干燥1 kg核桃坚果耗电1.2 kW·h),真空干燥和真空变温干燥除加热装置外还有抽真空装置,消耗电能较高(真空干燥能耗为每干燥1 kg核桃坚果耗电1.5 kW·h),真空变温干燥由于干燥时间较长,其消耗电能最高(能耗为每干燥1 kg核桃坚果耗电2.0 kW·h)。

综上所述,自然晒干法虽然没有电能消耗,但核桃在贮藏过程中褐变严重。热风干燥法相对真空干燥法和真空变温干燥法,耗能少,但核桃在贮藏过程中褐变度显著高于真空干燥法和真空变温干燥法。真空变温干燥法虽然能维持核桃内种皮较高的多酚含量,提高SOD、CAT、POD等抗氧化酶活性,同时降低了PPO、LOX活性及褐变度,但总体上与真空干燥法差异不显著,且耗能较真空干燥法高。综合考虑,在核桃采后商品化处理中,干燥方法宜选择真空干燥。

#### 参考文献:

- [1] 彭宇航. 核桃果实冷藏期抗氧化代谢与褐变关系的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [2] 王一峰,赵淑玲,王瀚,等. 不同核桃种质展叶期抗寒性的综合评价[J]. 经济林研究,2019,37(1):50-60.
- [3] 白鸽,王甄妮,朱丹实,等. 采后果实的果皮褐变机理及防褐变研究进展[J]. 包装工程,2021,42(5):80-87.
- [4] 叶妞. 气体协同控制青皮核桃果实褐变的效应及生理机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [5] 王艳颖,胡文忠,庞坤,等. 机械伤害引起果蔬褐变机理的研究进展[J]. 食品工业科技,2007,28(11):230-233.
- [6] 曾镇. 不同干制方式下竹荪营养品质的对比及褐变行为研究[D]. 成都:成都大学,2023.
- [7] BARBOSA-CÁNOVAS G V, VEGA-MERCADO H. Dehydration of Foods[M]. London:Chapman & Hal,1996:114-117.
- [8] 王文倩,王晗琦,陈文,等. 不同干燥方法对核桃品质及不饱和脂肪酸稳定性的影响[J]. 食品科学技术学报,2015,33(1):59-64.
- [9] PRAVEEN K D, UMESH H H, S UKUMAR D, et al. Infrared and hot-air drying of onions[J]. Journal of Food Processing and Preservation,2005,29(2):132-150.
- [10] 陈佳妮,罗耀华,孔慧,等. 热激处理对鲜切百合鳞茎片贮藏品质的影响[J]. 食品科学,2024,45(9):163-172.
- [11] GAO H, CHAI H, CHENG N, et al. Effects of 24-epibrassinolide on enzymatic browning and antioxidant activity of fresh-cut lotus root slices[J]. Food Chemistry, 2017,217:45-51.
- [12] KUMAR D, LADANIYA M S, GURJAR M, et al. Impact of drying methods on natural antioxidants, phenols and flavanones of immature dropped *Citrus sinensis* L. Osbeck fruits[J]. Scientific Reports,2022,12:6684.
- [13] MA Y P, WANG C Y, LIU C B, et al. Physicochemical responses of the kernel quality, total phenols and antioxidant enzymes of walnut in different forms to the low-temperature storage[J]. Foods, 2021,10(9):2027.
- [14] 郑龙. 板栗品种褐变度差异性及其与多酚氧化酶活性的相关性研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2015.
- [15] 徐涓,张雯雯,李凯,等. 高温蒸汽处理对余甘子果汁贮藏期间的品质影响及褐变行为解析[J]. 食品科学,2019,40(23):246-252.
- [16] IGHODARO O M, AKINLOYE O A. First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX); their fundamental role in the entire antioxidant defence grid[J]. Alexandria Journal of Medicine,2018,54(4):287-293.
- [17] MESBAH B, FARHAD P, MOHAMMAD A S, et al. Arginine treatment attenuates chilling injury of pomegranate fruit during cold storage by enhancing antioxidant system activity[J]. Postharvest Biology and Technology,2018,137:31-37.
- [18] 王一峰,宫峥嵘,胡文斌,等. 采收期对核桃贮藏期间内种皮褐变的影响[J]. 经济林研究,2024,42(3):255-263.
- [19] FAN J, DU W, CHENG Q L, et al. Comparative transcriptomic analyses provide insights into the enzymatic browning mechanism of fresh-cut sand pear fruit[J]. Horticulturae,2021,7(11):502.
- [20] BURDON J, LALLU N, FRANCIS K, et al. The susceptibility of kiwifruit to low temperature breakdown is associated with pre-harvest temperatures and at-harvest soluble solids content[J]. Postharvest Biology and Technology,2007,43(3):283-290.
- [21] HO Q T, VERBOVEN P, VERLINDEN B E, et al. Controlled atmosphere storage may lead to local ATP deficiency in apple[J]. Postharvest Biology and Technology,2013,78:103-112.
- [22] ZHENG X L, TIAN S P, GIDLEY M J, et al. Slowing the deterioration of mango fruit during cold storage by pre-storage application of oxalic acid[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology,2007,82(5):707-714.
- [23] 胡康棣,彭湘君,姚改芳,等. 不同耐贮性甘薯的抗氧化特性差异[J]. 江苏农业科学,2021,49(16):162-168.

- [24] 林之林,郝田,于景金,等. 盐胁迫下3种外源物对高羊茅生理指标的影响[J]. 草业科学,2022,39(4):720-730.
- [25] 杨旭风,贾晓东,许梦洋,等. 薄壳山核桃采后种皮褐变生理机制的研究[J]. 果树学报,2022,39(9):1701-1709.
- [26] 万冰. 微加工百合鳞茎褐变机制及其调控研究[D]. 扬州:扬州大学,2018.
- [27] 李政红. 梨果褐变机理研究[D]. 保定:河北农业大学,2016.
- [28] ZHANG C, JIN Y Z, LIU J Y, et al. The phylogeny and expression profiles of the lipoxygenase (*LOX*) family genes in the melon (*Cucumis melo* L.) genome [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 170: 94-102.
- [29] WANG M, SUM J, FENG W H, et al. Identification of ripening-related lipoxygenase in tomato fruit as blanching indicator enzyme [J]. *Process Biochemistry*, 2008, 43(9):932-936.
- [30] BARGMANN B O, MUNNIK T. The role of phospholipase D in plant stress responses[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9(5):515-522.
- [31] YIFEN L, HETONG L, SHEN Z, et al. The role of active oxygen metabolism in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested longan fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 96:42-48.
- [32] LIU H, SONG L L, YOU Y L, et al. Cold storage duration affects litchi fruit quality, membrane permeability, enzyme activities and energy charge during shelf time at ambient temperature [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 60(1):24-30.
- [33] NUTTHACHAI P, YOSHIHIKO S, SUMIKO S, et al. A novel postharvest UV-C treatment to reduce chilling injury (membrane damage, browning and chlorophyll degradation) in banana peel [J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 130(1):73-77.
- [34] LIU H, JIANG Y M, LUO Y B, et al. A simple and rapid determination of ATP, ADP and AMP concentrations in pericarp tissue of litchi fruit by high performance liquid chromatography [J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2006, 4(44):531-534.
- [35] 邓华聪,邱鸿鑫,汪恕萍,等. 糖尿病红细胞膜 $\text{Na}^+\text{K}^+$ -ATP酶和 $\text{Mg}^{2+}$ -ATP酶活性改变与脂质过氧化的关系[J]. 重庆医科大学学报,1996,21(2):111-114.
- [36] 刘梦竹,周宏胜,胡花丽,等. 采收期对黄金梨果心褐变和膜脂过氧化的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(1):38-43.

(责任编辑:蒋永忠)