

泡核桃青果贮藏期间生理指标响应

梁 美^{1,2}, 王纪辉^{1,2}, 胡伯凯^{1,2}, 刘亚娜^{1,2}, 耿阳阳^{1,2},
张时馨^{1,2}, 曾亚军^{1,2}, 何佳丽², 杨 光³

(1. 贵州省核桃研究所, 贵州 贵阳 550005)

(2. 贵州省林业科学研究院, 贵州 贵阳 550005)

(3. 贵州阳光食品有限公司, 贵州 毕节 551600)

[摘要] 解析核桃青果低温贮藏期间氧化状态. 以“泡核桃”为试材, 研究在冷藏过程中核桃青果的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、脂氧合酶(LOX)、多酚氧化酶(PPO)活性及丙二醛(MDA)、可溶性蛋白质(SP)、还原糖(RS)、维生素 E(VE)、类黄酮、总酚(TP)含量变化. 结果表明, SOD、POD 活性呈先升高后降低的趋势走向, 贮藏 10 d 时酶活性较高为[(858.38±27.41) U/g 鲜重]、[(142.70±4.29) U/g 鲜重], 较 70 d 时降低 44.40%、54.02%. CAT、LOX、PPO 活性呈现波浪形变化, 在贮藏 40 d 时 CAT 活性较高为[(809.12±43.20) nmol·(min·g)⁻¹鲜重], 在贮藏 20 d 时 LOX 活性较高为[(161.74±4.05) U/g 鲜重], 在贮藏 10 d 时 PPO 活性较高为[(66.97±4.81) U/g 鲜重]; MDA 含量缓慢增加, RS 含量呈升高-下降的趋势变化, 在贮藏 10 d 时 RS 含量较高为[(69.39±2.34) mg/g 鲜重], 在贮藏 10 d 时 VE 含量较高为[(619.47±38.46) μg/g]. SP 含量呈先下降再升高的趋势变化, 类黄酮、总酚(TP)含量变化较为一致均呈“N”字型走向; 相关性分析表明, 贮藏时间与 SOD、RS 呈现出极显著性负相关关系($r=-0.91$ 、 -0.90 , $P<0.01$), 贮藏时间与 MDA、SP 则呈极显著性正相关关系($r=0.94$ 、 0.89 , $P<0.01$), 部分指标呈显著/极显著性正负相关; 主成分分析结果表明, SOD、POD、CAT、LOX 等众多生理指标与果实品质密切相关, 可作为评价其氧化程度的重要指标. 以上结果可为民间冷库贮藏青核桃提供基础数据.

[关键词] 泡核桃, 贮藏, 生理指标, 响应

[中图分类号] TS255.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2023)04-0021-08

Response of Physiological Index during the Storage of *Juglans sigillata* Dode. Walnut with Husk

Liang Mei^{1,2}, Wang Jihui^{1,2}, Hu Bokai^{1,2}, Liu Yana^{1,2}, Geng Yangyang^{1,2},
Zhang Shixin^{1,2}, Zeng Yajun^{1,2}, He Jiali², Yang Guang³

(1. Guizhou Institute of Walnut, Guiyang 550005, China)

(2. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China)

(3. Guizhou Sunshine Food Company Limited, Bijie 551600, China)

Abstract: The oxidation state of walnut with husk was analyzed during the low-temperature storage. *Juglans sigillata* Dode was used as the test material, the superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), lipooxygenase (LOX), polyphenol oxidase (PPO) activity and malondialdehyde (MDA), soluble protein (SP), reducing sugar (RS), VE, flavonoids, total phenol (TP) content changes were studied. The results showed that SOD and POD activity increased firstly and then decreased, and the enzyme activity was higher at 10 d of storage that was [(858.38±27.41) U/g fresh weight], and [(142.70±4.29) U/g fresh weight], which was reduced by 44.40% and 54.02% compared with 70 d. CAT, LOX, and PPO activity showed wavy changes, the CAT activity was higher at 40 d of storage that was [(809.12±43.20) nmol·(min·g)⁻¹ fresh weight], the LOX activity was higher at 20 d of storage that was [(161.74±4.05) U/g fresh weight], the PPO activity was higher at 10 d of storage that was [(66.97±4.81) U/g fresh weight]; The MDA content was slowly increased, the RS

收稿日期: 2023-02-15.

基金项目: 贵州省科技计划重点项目(黔科合支撑[2022]重点 014 号)、贵州省木本粮油加工科技创新人才团队平台项目(黔科合平台人才[2020]5003)、贵州省林业厅优秀青年人才培养专项资金项目(黔林科合 J[2018]16 号).

通讯作者: 王纪辉, 硕士, 副研究员, 研究方向: 经济林加工. E-mail: 1833247257@qq.com

content was higher at 10 d of storage that was $[(69.39 \pm 2.34) \text{ mg/g fresh weight}]$, the VE content was higher at 10 d of storage that was $[(619.47 \pm 38.46) \mu\text{g/g}]$. The SP content showed a trend of decreasing firstly, and then increasing, and the content of flavonoids and total phenol (TP) showed a trend change of "N" type; Correlation analysis showed that storage time showed a very significant negative relationship with SOD and RS ($r = -0.91, -0.90, P < 0.01$), and storage time showed a very significant positive relationship with MDA and SP ($r = 0.94, 0.89, P < 0.01$), some indicators showed a significant/very significant positive/negative correlation; The results of the principal component analysis showed that many physiological indicators such as SOD, POD, CAT, and LOX were closely related to fruit quality, and could be used as an important indicator to evaluate degree of oxidation of walnut with husk. The above results provided basic data for walnut with husk storage in folk freezer.

Key words: *Juglans sigillata* Dode, storage, physiological indicators, response

核桃(*Juglans regia* L.)是胡桃科、核桃属的植物,其核仁内含有多种营养物质^[1],其中以人体所必需的不饱和脂肪酸^[2-3]、六大营养素^[4]最为丰富.核桃通常进入市场的方式主要以带壳或去壳的干果为主^[5-6],但核桃采摘后对其进行干燥的过程会引起核仁中部分营养物质因高温氧化而产生劣变^[7].近年来,鲜食核桃因未经干燥,避免了在干燥过程中的营养成分流失^[8],加之鲜食核桃香甜的口感^[9]、独特的风味而备受推崇^[10],目前在我国的核桃主要产区已形成了一定规模的消费市场^[11].泡核桃为贵州本地的优良农家品种,具有一定的抗病和耐湿热性,在贵州本地种植范围较广,市场推崇度较高,尤以贵州省赫章县核桃市场认可度较高.此外,贵州地区因其独特的地理环境和气候造就了贵州当地鲜食泡核桃特有的香甜口感,在西南地区备受欢迎,尤其是在中高档餐厅作为一道独特的美味佳肴很受消费者喜爱.然而鲜食核桃水分含量较高,冷藏虽然可抑制部分酶的活性,但鲜食核桃的呼吸作用仍在进行^[12].因此,了解和掌握鲜食核桃冷藏过程中的各生理指标的响应变化,对于预测鲜食核桃冷藏过程中的品质变化至关重要^[13-14].所以对采后泡核桃青果冷藏过程中的生理指标响应变化进行探究十分必要,也可以为民间泡核桃青果较为基本的贮藏保鲜提供数据参考^[15-16].鉴于此,本研究以贵州本地乡间泡核桃青果为试材,跟踪分析泡核桃青果在低温自然裸露环境下的氧化状态,探究泡核桃青果在3~4℃冷藏过程中的果实生理响应变化,基于相关性揭示各生理生化指标间的协同和拮抗作用,依据主成分分析较为科学合理地阐释各生理生化指标与泡核桃青果品质的相关密切程度.

1 材料与方法

1.1 实验材料

以核桃青果皮颜色略黄且尚未开裂为标准进行采收,泡核桃青果采自贵州省赫章县财神镇某农家果园,约九成熟,选择大小较为一致、青皮无损伤、未褐变及无病虫害的果实.采后立即将核桃青果运至贵州省核桃研究所冷库中降温备用.

1.2 主要仪器与设备

L5S型紫外可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司);3-18R台式高速冷冻离心机(湖南可成仪器设备有限公司);多功能酶标仪(BIOTEK).

1.3 实验方法

1.3.1 实验设计

以贮藏温度3~4℃、相对湿度85%~90%进行核桃青果贮藏实验.每次取10个核桃青果,取出核仁装入自封袋置于-80℃超低温冰箱中保存样品备用,定期对核桃青果的生理指标进行分析测定.

1.3.2 指标测定

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、脂氧合酶(LOX)、多酚氧化酶(PPO)活性测定及丙二醛(MDA)、可溶性蛋白、还原糖、VE、类黄酮、植物总酚(TP)含量测定均采用试剂盒(购自苏州科铭生物技术有限公司).每个指标值进行3次生物学重复,取其平均值.

1.4 数据分析

以Excel 2007进行数据处理与整理,通过Origin 9.1进行图形绘制,以SPSS19.0软件对所得的试验数据进行Duncan多重比较,以SPSS19.0软件中的分析-降维-因子分析进行主成分分析.

2 结果与分析

2.1 冷藏期间核桃青果超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性变化

由图1可知,随着贮藏时间的延长 SOD 活性呈现先升高又逐渐下降的趋势变化. 在 10 d 时 SOD 活性达到较高为 $[(858.38 \pm 27.41) \text{ U/g 鲜重}]$, 70 d 时 SOD 活性较低仅为 $[(594.44 \pm 7.52) \text{ U/g 鲜重}]$. 0~10 d 期间 SOD 活性升高, 10~70 d 期间 SOD 活性逐渐降低, 在 10~30 d 时 SOD 活性下降幅度达 10.51% ($P < 0.05$). 在 30~40 d 时 SOD 活性下降幅度较大, 降低 26.47% ($P < 0.05$). 在 40~70 d 时 SOD 活性下降幅度较为不明显, 降低 3.32% ($P > 0.05$).

由图1可知,随着贮藏时间延长 POD 活性整体上呈现先升高后逐渐下降趋势变化. 在 10 d 时 POD 活性达到较高为 $[(142.70 \pm 4.29) \text{ U/g 鲜重}]$, 0 d 时 POD 活性较低仅为 $[(92.65 \pm 1.50) \text{ U/g 鲜重}]$. 0~10 d 和 20~30 d 期间 POD 活性升高, POD 活性增加幅度分别为 54.02% ($P < 0.05$)、5.89% ($P > 0.05$). 10~20 d 和 30~70 d 期间 POD 活性逐渐降低, POD 活性下降幅度分别为 10.12% ($P < 0.05$)、31.32% ($P < 0.05$).

2.2 冷藏期间核桃青果过氧化氢酶(CAT)和脂氧合酶(LOX)活性变化

由图2可知,随着贮藏时间的延长 CAT 活性呈现“W”的趋势变化. 在 40 d 时 CAT 活性达到较高为 $[(809.12 \pm 43.20) \text{ nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1} \text{ 鲜重}]$, 20 d 时 CAT 活性较低为 $[(306.56 \pm 11.80) \text{ nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1} \text{ 鲜重}]$. 0~30 d 和 40~55 d 期间 CAT 活性下降; 30~40 d 和 55~70 d 时 CAT 活性升高. 在 0~30 d 时 CAT 活性下降幅度达 73.57% ($P < 0.05$). 在 40~55 d 时 CAT 活性下降幅度较大, 降低 77.00% ($P < 0.05$). 在 30~40 d 时 CAT 活性升高幅度较大, 增加 159.17% ($P < 0.05$). 在 55~70 d 时 CAT 活性升高 19.20% ($P < 0.05$).

由图2可知,随着贮藏时间的延长 LOX 活性呈现类似“W”的趋势变化. 在 20 d 时 LOX 活性达到较高为 $[(161.74 \pm 4.05) \text{ U/g 鲜重}]$, 10 d 时 LOX 活性较低为 $[(92.23 \pm 5.50) \text{ U/g 鲜重}]$. 0~10 d 和 20~40 d、55~70 d 期间 LOX 活性下降; 10~20 d 和 40~55 d 期间 LOX 活性升高. 在 0~10 d 时 LOX 活性下降幅度较大, 降幅达 69.90% ($P < 0.05$). 在 20~40 d 时 LOX 活性降低 62.62% ($P < 0.05$). 贮藏时间在 55~70 d 期间时 LOX 活性降低 6.32% ($P > 0.05$). 在 10~20 d 时 LOX 活性升高幅度较大, 为 75.37% ($P < 0.05$). 在 40~55 d 时 LOX 活性升高 35.00% ($P < 0.05$).

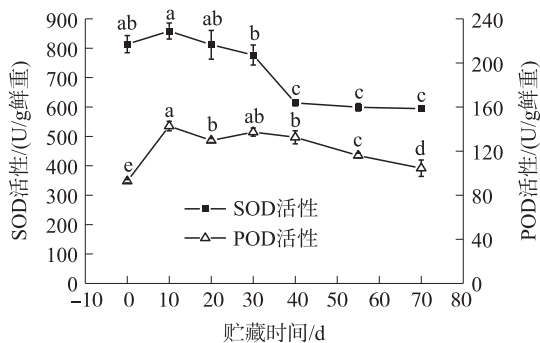


图1 冷藏期间超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性变化

Fig. 1 Changes in superoxide dismutase(SOD) and peroxidase(POD) activity during cold storage

注:图中不同小写字母表示差异性显著($P < 0.05$),相同小写字母表示差异性不显著($P > 0.05$). 图2~5同.

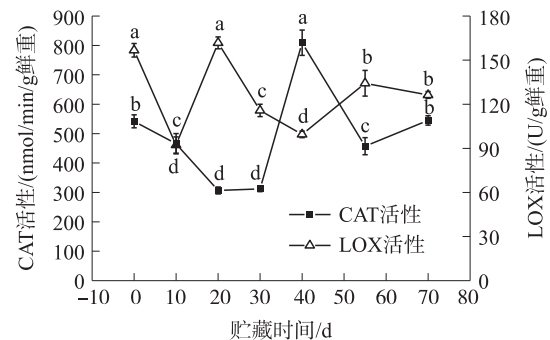


图2 冷藏期间过氧化氢酶(CAT)和脂氧合酶(LOX)活性变化

Fig. 2 Changes in catalase(CAT) and lipoygenase(LOX) activity during cold storage

2.3 冷藏期间核桃青果丙二醛(MDA)和可溶性蛋白(SP)含量变化

由图3可知,随着贮藏时间的延长 MDA 含量呈现逐渐增加的趋势变化. 在 0~20 d 时 MDA 含量增加速率较慢, 20 d 时的 MDA 含量较 0 d 增加 8.11% ($P > 0.05$); 20~30 d 时 MDA 含量增加速率较快, 30 d 时的 MDA 含量较 20 d 增加 13.21% ($P < 0.05$). 30~55 d 时 MDA 含量增加速率较慢, 55 d 时的 MDA 含量较 30 d 增加 4.18% ($P > 0.05$); 55~70 d 时 MDA 含量增加速率较快, 70 d 时的 MDA 含量较 55 d 增加 5.53% ($P < 0.05$).

由图3可知,随着贮藏时间的延长 SP 含量表现为先下降又逐渐增加的趋势变化. 0~10 d 时 SP 含量

下降,0 d 时的 SP 含量较 10 d 降低 14.62% ($P<0.05$);10~30 d 时 SP 含量增加速率较快,30 d 时的 SP 含量较 10 d、20 d 时分别增加 28.05%、11.02%,20 d 时的 SP 含量较 10 d 增加 15.34%,此时 10 d、20 d、30 d 时的 SP 含量两两之间均达到显著性差异水平. 30~55 d 时 SP 含量增加速率较小,55 d 时的 SP 含量较 30 d 增加 2.69%,此时 30 d、40 d、55 d 时的 SP 含量差异性均不显著($P>0.05$);55~70 d 时 SP 含量增加速率较快,70 d 时的 SP 含量较 55 d 增加 24.27% ($P<0.05$).

2.4 冷藏期间核桃青果还原糖(RS)和 VE 含量变化

由图 4 可知,随着贮藏时间的延长 RS 含量表现为先增加又逐渐下降的趋势变化. 在低温贮藏期为 10 d 时的 RS 含量较高为[(69.39±2.34)mg/g 鲜重],70 d 时的 RS 含量较低为[(50.93±0.78)mg/g 鲜重]. 0~10 d 时 RS 含量升高,10 d 时的 RS 含量较 0 d 增加 9.45% ($P<0.05$). 在 10~70 d 时 RS 含量逐渐下降,其中在 10~20 d 时 RS 含量下降速率较快,10 d 时的 RS 含量较 20 d 降低 13.53% ($P<0.05$);20~40 d 时 RS 含量下降速率较小,20 d 时的 RS 含量较 40 d 降低 6.61% ($P<0.05$);40~70 d 时 RS 含量下降速率也较为缓慢,40 d 时的 RS 含量较 70 d 降低 12.57% ($P<0.05$).

由图 4 可知,随着贮藏时间的延长 VE 含量呈波浪形的趋势变化. 在低温贮藏期为 10 d 时的 VE 含量较高为[(619.47±38.46) $\mu\text{g/g}$],40 d 时的 VE 含量较低为[(435.84±12.97) $\mu\text{g/g}$];0~10 d、20~30 d、40~55 d 时 VE 含量升高,10 d 时的 VE 含量较 0 d 增加 35.20% ($P<0.05$),30 d 时的 VE 含量较 20 d 增加 6.95% ($P>0.05$),55 d 时的 VE 含量较 40 d 增加 34.29% ($P<0.05$). 在 10~20 d 时 VE 含量下降速率较快,10 d 时的 VE 含量较 20 d 降低 34.32% ($P<0.05$);30~40 d 时 VE 含量下降速率较慢,30 d 时的 VE 含量较 40 d 降低 13.17% ($P>0.05$);55~70 d 时 VE 含量下降速率也较为缓慢,55 d 时的 VE 含量较 70 d 降低 4.20% ($P>0.05$).

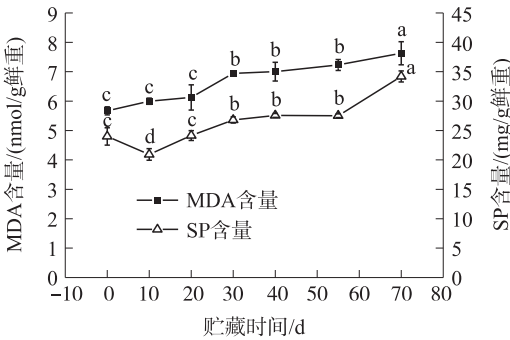


图 3 冷藏期间丙二醛(MDA)和可溶性蛋白(SP)含量变化
Fig. 3 Changes in malondialdehyde(MDA) and soluble protein(SP) content during cold storage

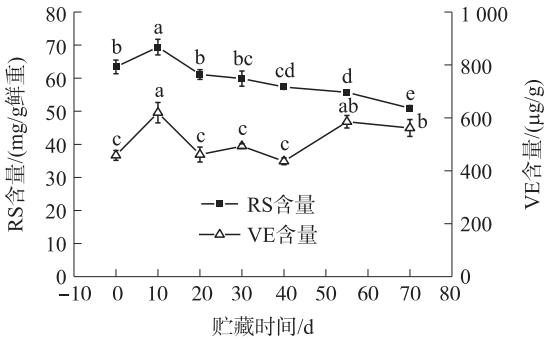


图 4 冷藏期间还原糖(RS)和 VE 含量变化
Fig. 4 Changes in reducing sugar and VE content during cold storage

2.5 冷藏期间核桃青果类黄酮、总酚(TP)含量和多酚氧化酶(PPO)活性变化

由图 5 可知,随着贮藏时间的延长类黄酮含量呈“N”形的趋势变化. 在贮藏 70 d 时的类黄酮含量较高为[(3.99±0.06)mg/g 干重],20 d 时的类黄酮含量较低为[(1.50±0.04)mg/g 干重];0~10 d、20~70 d 时类黄酮含量升高,10 d 时的类黄酮含量较 0 d 增加 8.51% ($P>0.05$). 20~40 d 时类黄酮含量增速较快,40 d 时类黄酮含量较 20 d 增加 56.00% ($P<0.05$). 40~55 d 时类黄酮含量增速较慢,55 d 时类黄酮含量较 40 d 增加 14.10% ($P<0.05$). 55~70 d 时类黄酮含量增速也较快,70 d 时类黄酮含量较 55 d 增加 49.44% ($P<0.05$). 在 10~20 d 时类黄酮含量下降速率较快,20 d 时的类黄酮含量较 10 d 降低 70.00% ($P<0.05$).

由图 5 可知,随着贮藏时间的延长 TP 含量呈“N”形的趋势变化. 在整个低温贮藏期间 70 d 时的 TP 含量较高为[(7.98±0.21)mg/g 干重],20 d 时的 TP 含量较低为[(1.06±0.05)mg/g 干重];0~10 d、20~70 d 时 TP 含量升高,10 d 时的 TP 含量较 0 d 增加 57.93% ($P<0.05$). 20~30 d 时 TP 含量增速较慢,30 d 时 TP 含量较 20 d 增加 51.89% ($P<0.05$). 30~40 d 时 TP 含量增加迅速,40 d 时的 TP 含量是 30 d 的 4.50 倍($P<0.05$). 40~70 d 时 TP 含量增速变慢,70 d 时 TP 含量较 40 d 增加 10.07% ($P<0.05$),但 70 d 时 TP 含量与 55 d 的 TP 含量、55 d 时 TP 含量与 40 d 的 TP 含量均未达到显著性差异水平($P>0.05$). 在 10~20 d 时 TP 含量下降速率较快,20 d 时的 TP 含量较 10 d 降低 116.04% ($P<0.05$).

由图 5 可知,随着贮藏时间的延长 PPO 活性呈现波浪形的趋势变化. 在 10 d 时 PPO 活性达到较高为 $[(66.97\pm4.81)\text{U/g 鲜重}]$, 70 d 时 PPO 活性较低为 $[(39.22\pm2.33)\text{U/g 鲜重}]$. 0~10 d 和 20~30 d、40~55 d 期间 PPO 活性升高;10~20 d 和 30~40 d、55~70 d 期间 PPO 活性下降. 在 0~10 d 时 PPO 活性升高幅度较大,增幅达 52.17% ($P<0.05$). 在 20~30 d 时 PPO 活性升高 9.66% ($P>0.05$). 在 40~55 d 期间 PPO 活性升高 19.45% ($P<0.05$). 在 10~20 d 时 PPO 活性下降幅度为 23.45% ($P<0.05$). 在 30~40 d 时 PPO 活性下降幅度为 20.13% ($P<0.05$). 在 55~70 d 时 PPO 活性下降幅度较大,降低 50.82% ($P<0.05$).

2.6 各生理指标间相关性分析

由图 6 可知,贮藏时间与 SOD、RS 呈现出极显著性负相关关系($r=-0.91$ 、 -0.90 , $P<0.01$),表明随着贮藏时间的延长 SOD 的活性变弱,尤其是在贮藏后期 SOD 清除核桃青果因呼吸代谢产生的自由基和活性氧的能力降低,核桃青果后期腐烂、霉变程度加剧. 此外,核桃青果采摘后失去光合作用,糖类化合物的合成不能进行,但贮藏期间青果的呼吸作用仍在进行,致使之前通过光合作用合成的糖类逐渐被消耗. 贮藏时间与 TP 呈显著性正相关($r=0.87$, $P<0.05$),贮藏时间与 MDA、SP 则呈极显著性正相关关系($r=0.94$ 、 0.89 , $P<0.01$),说明随着贮藏时间的延长,核桃青果果仁中的总酚含量在逐渐积累,果仁中的其它物质被氧化或者转化为酚类物质. 在贮藏过程中核桃青果逐渐失去水分,致使细胞在水分胁迫的情况将细胞组织中的游离氨基酸迅速合成可溶性蛋白以提高细胞的保水能力. 核桃青果采摘后,虽然部分有益酶仍在发挥作用来维持果实的生理代谢平衡,然而果实的膜脂过氧化仍在发生,果实中自由基和活性氧的积累引起细胞膜脂过氧化,生成丙二醛,核桃青果逐渐衰老;SOD 与 MDA、SP 呈显著性负相关关系($r=-0.84$ 、 -0.83 , $P<0.05$),SOD 与 TP 呈极显著性负相关关系($r=-0.96$, $P<0.01$),表明当果实在受到外界不良环境的胁迫时,细胞组织内的 SOD 首先发挥作用,以此来清除组织内因代谢失衡而产生的自由基和活性氧来维持机体代谢平衡,随着贮藏时间延长,果实失水加剧,SOD 活性下降,贮藏后期主要以合成的可溶性蛋白来维持果实的代谢. 核桃青果采摘后机体代谢处于平衡的边缘,自由基和活性氧的代谢处于失衡状态,自由基作用于脂质发生过氧化反应,氧化终产物为丙二醛. 青果失水加剧引起多酚氧化酶活性降

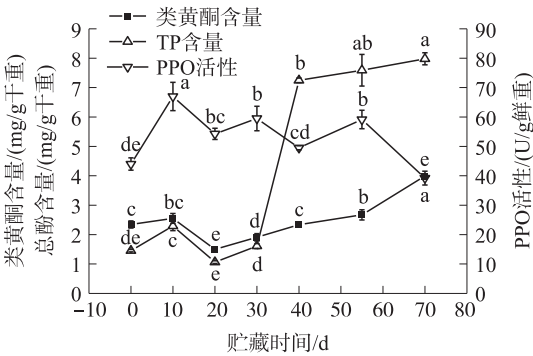


图 5 冷藏期间类黄酮、总酚 (TP) 含量和多酚氧化酶 (PPO) 活性变化

Fig. 5 Changes in flavonoids, total phenol (TP) content and polyphenol oxidase (PPO) activity during cold storage

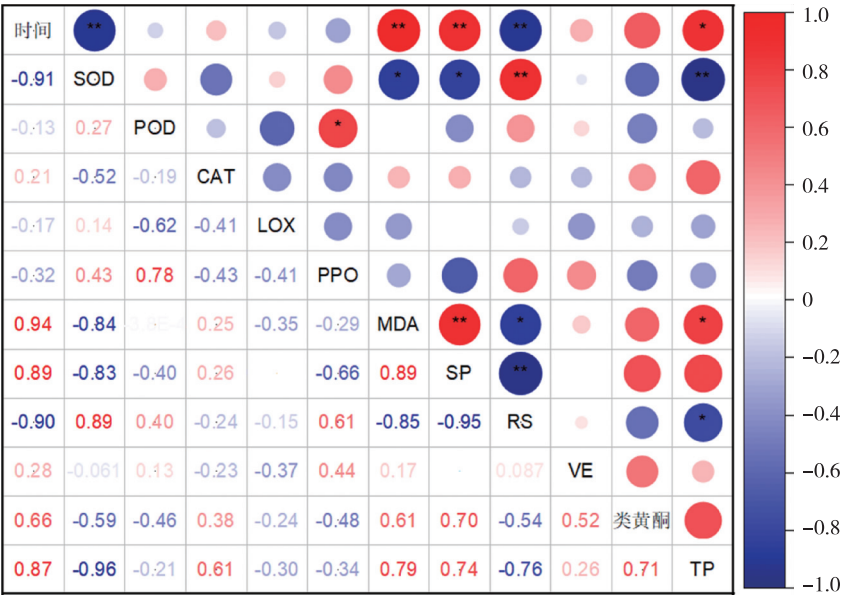


图 6 各指标间的 Pearson 相关系数

Fig. 6 Results of pearson correlation coefficient among each index

低,细胞组织内多酚物质的氧化中断,加之其它物质的氧化及转化引起总酚含量增加.此外,SOD 与 RS 呈极显著性正相关关系($r=0.89, P<0.01$),说明随着核桃青果失水加剧,SOD 的活性下降,机体代谢的失衡导致青果的呼吸作用加强,进一步来维持机体代谢,从而引起细胞组织内原有积累的还原糖被逐渐消耗;POD 与 PPO 呈显著性正相关($r=0.78, P<0.05$),说明随着贮藏时间的延长,青果逐渐失去水分,致使 POD 和 PPO 的活性降低;MDA 与 SP、TP 呈现出极显著性正相关、显著性正相关($r=0.89, P<0.01$ 、 $0.79, P<0.05$),MDA 与 RS 呈显著性负相关($r=-0.85, P<0.05$),表明青果采摘后受到外界环境的胁迫,自由基和活性氧代谢失去平衡,引起膜脂过氧化发生,引起丙二醛含量增加.此外,青果为减缓水分丧失,加速了游离氨基酸进一步合成可溶性蛋白,因为机体失水加剧,细胞组织内其它物质逐渐被氧化生成多酚物质,加之多酚氧化酶活性下降致使总酚含量增加.由于机体自由基、活性氧的生成及清除处于失衡状态,青果为使这种状态发生逆转,呼吸作用增强,引起还原糖消耗量逐渐增加;SP 与 RS 呈极显著性负相关($r=-0.95, P<0.01$),RS 与 TP 呈显著性负相关($r=-0.76, P<0.05$),说明青果在低温贮藏过程中,因受到外界环境的胁迫,体内游离氨基酸合成可溶性蛋白的速度加快,而青果为维持机体代谢的平衡,加强了呼吸作用.青果一方面受到外界环境的胁迫,另一方面又受到细胞内自由基和活性氧代谢失衡的威胁,最终引起多酚氧化酶活性降低,总酚含量增加.

3 讨论

抗氧化酶可在植物体内维持机体代谢平衡及清除活性氧(ROS),其作用至关重要^[17].本研究发现低温贮藏期间核桃青果的 SOD 活性表现为升高-降低的趋势走向,而 CAT 活性则表现为先降低再升高的趋势变化,究其原因可能是采后核桃青果在贮藏初期活性氧增加迅速,此时 SOD 可能是作为防御的第一道屏障体系首先发挥效用,催化超氧阴离子自由基歧化为过氧化氢和氧^[18],而在歧化初期产生的 H_2O_2 因浓度较低又进一步诱导青果机体内 ROS 及自由基清除酶系统的生理活性加速^[19],所以在低温贮藏初期 SOD 活性呈上升的趋势变化;核桃青果在贮藏初期果实内过氧化氢含量较低,还不足以激发 CAT 发挥作用^[20],因此,贮藏初期 CAT 活性出现下降趋势.核桃青果贮藏 20~40 d 时,SOD 将大量的超氧化物歧化生成了 H_2O_2 ,此时积累的大量 H_2O_2 进一步诱导 CAT 的活性迅速升高^[21],而此时的 POD 活性也处于高位,CAT 和 POD 二者协同发挥效用将产生的大量 H_2O_2 降解成 H_2O 、 O_2 ^[22].随着贮藏时间的延长,ROS、自由基的产生量远超过其清除量,二者的机体代谢失去平衡,引起二者不断累积,加之青果失水加剧,SOD 和 POD 活性下降,破坏了核桃青果组织细胞膜与酶系统,核桃青果逐渐表现为衰老^[23].此外,本研究发现 LOX 活性呈现下降-升高-下降的趋势变化,究其原因可能是贮藏初期 SOD 和 POD 活性处于高位,产生的超氧化物及自由基能够被及时清除,加之此时青果保存较好,微生物尚未大量繁殖^[24].在贮藏 10~20 d 时 LOX 活性迅速升高,原因可能是青果在贮藏过程中其呼吸作用仍在进行,经过一段时间的贮藏产生大量的热,此时青果水分含量还较高,从而引起微生物迅速繁殖,致使果仁中 LOX 活性升高^[25-26].

本研究发现 RS 含量在贮藏过程中呈现升高-下降的趋势变化,究其原因可能是核桃青果在采摘后失去了光合作用,但在贮藏过程中其呼吸作用仍在进行,为了维持植物体代谢平衡,植物体内大分子物质分解成小分子物质以此来呼吸作用,因此,在贮藏初期 RS 含量表现为增加,SP 含量则表现为下降.在贮藏 10~70 d 时 RS 含量呈下降趋势,而 SP 含量则逐渐增加,原因可能是随着贮藏时间延长,植物体内之前合成的还原糖被逐渐消耗,而此时核桃青果处于外界不良环境的胁迫中,为维持机体代谢稳定将体内的游离氨基酸逐步合成可溶性蛋白以对抗外界不良环境的胁迫^[27].

核桃青果果仁中因含有类黄酮和总酚物质,在一定程度上可抑制果仁褐变的发生^[28].本研究发现,在贮藏时间为 0~10 d 和 20~70 d 时类黄酮和总酚含量均呈现增加的趋势变化,而在 10~20 d 时类黄酮和总酚含量均呈现下降的趋势变化,原因可能是贮藏初期酚类物质合成速率高于氧化速率.贮藏后期类黄酮和总酚含量逐渐增加,一方面可能是 POD 和 PPO 活性逐渐变弱,不能进一步将多酚类物质氧化,另一方面可能是因为核桃青果逐渐霉变、腐烂,微生物大量繁殖,果仁中的大分子物质在酶及微生物的作用下逐渐被降解转化为酚类物质^[29].核桃青果果仁中含有一定的酚类物质,食用后可提高机体的抗氧化能力及缓解部分炎症^[30].

4 结论

低温保存有利于延长核桃青果的贮藏时间,SOD、POD、CAT 通过协同效应共同维持植物体内活性氧和自由基代谢平衡.此外,各生理生化指标之间存在协同、拮抗作用,能较好的维持果实品质.后期可从一级反应动力学角度出发来预测和模拟鲜食核桃品质变化.

[参考文献]

- [1] 梁美,耿阳阳,王纪辉,等. 新型鲜核桃贮藏保鲜剂的研究进展[J]. 四川农业科技,2020(1):52-54.
- [2] 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.
- [3] 季琳琳,陈素传,吴志辉,等. 山核桃果实主要经济性状和养分含量的差异分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(1):131-137.
- [4] 覃芳,史艳财,邹蓉,等. 喙核桃与核桃营养成分的比较分析[J]. 食品科技,2020,45(7):93-97.
- [5] ASAAD, HABIBIE, NAVID, et al. Ascorbic acid incorporated with walnut green husk extract for preserving the postharvest quality of cold storage fresh walnut kernels[J]. Scientia horticulturae, 2019, 245(2):193-199.
- [6] 徐效圣,傅力,李建飞,等. 鲜核桃营养成分分析及风味物质 GC-MS 研究[J]. 食品工业,2012,33(11):188-190.
- [7] AHAD T, GULL A. Effect of synthetic antioxidants, packaging materials and storage periods on quality characteristics of walnut kernels[J]. Biomass conversion and biorefinery, 2023, (2):1-11.
- [8] 魏芳. 采后商品化处理对核桃品质的影响[D]. 济南:齐鲁工业大学,2020.
- [9] RÉBUFA C, ARTAUD J, LE DRÉAU Y. Walnut (*Juglans regia* L.) oil chemical composition depending on variety, locality, extraction process and storage conditions: a comprehensive review[J]. Journal of food composition and analysis, 2022, 110(7):104534.
- [10] 黄梅,姚小华,杨水平,等. 不同时间真空贮藏对薄壳山核桃品质的影响[J]. 四川农业大学学报,2022,40(3):458-464.
- [11] 丁真真,夏娜,刘艳全,等. 两种天然保鲜剂对气调包装青皮核桃贮藏期品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2):271-278.
- [12] 弘子姗,伏盼,解静,等. 石蜡包埋对鲜核桃保鲜效果的影响[J]. 食品科技,2022,47(10):93-99.
- [13] HAN M, ZHAO J, WU Q, et al. Effects of packaging materials on structural and simulated digestive characteristics of walnut protein during accelerated storage[J]. Foods, 2023, 12(3):620.
- [14] 曲清莉,傅茂润,代红飞. 脂氧合酶(LOX)在脂肪酸氧化中的作用研究进展[J]. 食品研究与开发,2015,36(10):137-142.
- [15] MITCHAM E, ADKISON C, LINGGA N, et al. Storage temperature, relative humidity, and time effects on the organoleptic profile of walnut kernels[J]. Journal of the American society for horticultural science, 2022, 147(6):291-299.
- [16] 王纪辉. 青核桃冷藏期间氧化状态分析[J]. 广西植物,2020,40(7):1054-1060.
- [17] 耿阳阳,徐俐,马宝军,等. 不同品种鲜食核桃冷藏期间品质及生理变化[J]. 食品科技,2013,38(3):49-54.
- [18] LIU M Z, LI C H, CAO C M, et al. Walnut fruit processing equipment: academic insights and perspectives[J]. Food engineering reviews, 2021, 13(4):822-857.
- [19] PRAEGER U, HERPPICH W B, HASSENBERG K. Aqueous chlorine dioxide treatment of horticultural produce: effects on microbial safety and produce quality—a review[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2018, 58(2):318-333.
- [20] KINGSLEY H D, PÉREZ-PÉREZ E R, NIEMIRA A B, et al. Evaluation of gaseous chlorine dioxide for the inactivation of Tulane virus on blueberries[J]. International journal of food microbiology, 2018, 273(5):28-32.
- [21] SINGH S, MAJI P K, LEE Y S, et al. Application of gaseous chlorine dioxide for an antimicrobial food packaging: a review[J]. Environmental chemistry letters, 2019, 6(2):214-219.
- [22] SUN X X, BALDWIN E, BAI J H. Applications of gaseous chlorine dioxide on postharvest handling and storage of fruits and vegetables—a review[J]. Food control, 2019, 95(1):18-26.
- [23] YOUSUF S, MAKTEDAR S S. Influence of quince seed mucilage-alginate composite hydrogel coatings on quality of fresh walnut kernels during refrigerated storage[J]. Journal of food science and technology, 2022, 59(12):4801-4811.
- [24] 王纪辉,耿阳阳,侯娜. 鲜核桃低温贮藏期间的指标响应[J]. 南方农业学报,2019,50(6):1312-1318.
- [25] 王纪辉,耿阳阳,侯娜. 不同贮藏方式下鲜核桃生理指标响应及动力学模型[J]. 江苏农业学报,2019,35(4):927-932.

-
- [26] GULL A, MASOODI F A, MASOODI L, et al. Effect of sodium alginate coatings enriched with α -tocopherol on quality of fresh walnut kernels[J]. Food chemistry advances, 2023, 2(10): 100169.
- [27] CHEN Z, ZHU C H, ZHANG Y, et al. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on enzymatic browning and shelf-life of fresh-cut asparagus lettuce(*Lactuca sativa* L.) [J]. Postharvest biology and technology, 2010, 58(3): 232–238.
- [28] ZHAO H D, FU M R, DU Y M, et al. Improvement of fruit quality and pedicel color of cold stored sweet cherry in response to prestorage 1-methylcyclopropene and chlorine dioxide treatments combination treatment of 1-MCP plus ClO_2 improves postharvest quality of sweet cherry fruit[J]. Scientia horticulturae, 2021, 277(2): 109806.
- [29] MA Y P, LI P, WATKINS C B, et al. Chlorine dioxide and sodium diacetate treatments in controlled atmospheres retard mold incidence and maintain quality of fresh walnuts during cold storage [J]. Postharvest biology and technology, 2020, 161(3): 111063.
- [30] 吴书天. 核桃仁中多酚形态分布及其抗氧化关联分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021.

[责任编辑: 杜忆忱]