

香茅精油对贮藏马铃薯抑芽效果及活性氧代谢作用

朱磊¹, 关文强^{1*}, 林琼^{2*}, 张倩倩², 何兴兴¹, 王凤玲¹

(1. 天津市食品生物技术重点实验室, 天津商业大学, 天津 300134) (2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

摘要: 探究香茅 (*Cymbopogon citratus* (DC.)) 精油 (Citronella Essentially Oil, CEO) 熏蒸处理对采后马铃薯贮藏期间抑芽效果及活性氧代谢作用机理。以“内蒙古 V7”马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 为试材, 在 20 ± 2 °C 下采用自制熏蒸装置定期 CEO 熏蒸马铃薯 6 h, 每隔 14 d 测定马铃薯抑芽效果及活性氧代谢相关指标。结果表明, 马铃薯贮藏 70 d 后, CEO 处理组发芽率、失重率分别比对照组降低了 100.00%、28.30%。CEO 处理马铃薯的呼吸强度在贮藏前期低于对照组, 但贮藏 42 d 后高于对照组。CEO 处理降低了马铃薯过氧化氢含量、超氧阴离子自由基产生速率, 贮藏 70 d 时分别比对照组降低 38.32%、59.02%; CEO 处理提高了马铃薯贮藏过程中过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶、抗氧化酶和超氧化物歧化酶活性, 其中对过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的影响显著 ($P < 0.05$)。综上, CEO 处理能够提高马铃薯块茎中抗氧化酶活性、减少活性氧积累, 有效延长马铃薯贮藏期, 抑制马铃薯发芽, 在提高马铃薯贮藏品质方面具有应用潜力。

关键词: 香茅精油; 马铃薯; 抑芽效果; 活性氧; 代谢机理

文章编号: 1673-9078(2025)12-109-116

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1301

Effect of Citronella Essential Oil on Bud Inhibition and Reactive Oxygen Species Metabolism in Stored Potatoes

ZHU Lei¹, GUAN Wenqiang^{1*}, LIN Qiong^{2*}, ZHANG Qianqian², HE Xingxing¹, WANG Fengling¹

(1. Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

(2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to explore the effect of citronella essential oil (CEO) fumigation on bud inhibition and reactive oxygen species metabolism mechanism during postharvest potato storage, “Inner Mongolia V7” potato was used as the test material, and the self-made fumigation device was used to fumigate the potatoes regularly with CEO for 6 h at 20 ± 2 °C, and the bud inhibition effect and reactive oxygen species metabolism-related indexes were measured every 14 days. The results showed that after 70 days of potato storage, the sprouting rate and weight loss rate of the CEO-treated group were reduced by 100.00% and 28.30%, respectively, compared with the control group. The respiration intensity of the CEO-treated potatoes was lower than that of the control group before storage, but higher than that of the control group after 42 days of storage. The CEO treatment reduced the hydrogen peroxide content and the production rate of superoxide anion radical in potatoes, and after 70 days of storage, both were reduced by 38.32% and 59.02% compared with the control. The CEO treatment increased the activities of catalase, ascorbate peroxidase, peroxidase and superoxide dismutase during potato storage, and the effects on catalase and ascorbate peroxidase were significant ($P < 0.05$).

引文格式:

朱磊,关文强,林琼,等. 香茅精油对贮藏马铃薯抑芽效果及活性氧代谢作用[J].现代食品科技,2025,41(12):109-116.

ZHU Lei, GUAN Wenqiang, LIN Qiong, et al. Effect of citronella essential oil on bud inhibition and reactive oxygen species metabolism in stored potatoes [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 109-116.

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-12-18; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 天津市科技计划重点项目 (23JCZDJC00690); 中国农业科学院青年创新专项 (Y2024QC12)

作者简介: 朱磊 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 1441042898@qq.com

通讯作者: 关文强 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: gwq18@163.com; 共同通讯作者: 林琼 (1985-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬采后品质调控与贮运保鲜, E-mail: Linqiong@caas.cn

In conclusion, the CEO treatment can increase the activities of antioxidant enzymes in potato tubers, reduce the accumulation of reactive oxygen species, effectively prolong the storage period of potatoes, and inhibit potato sprouting, showing the application potential for improving potato storage quality.

Key words: citronella essential oil; potato; bud-inhibiting effect; reactive oxygen; metabolic mechanism

马铃薯为茄科茄属多年生草本植物, 含有大量淀粉以及人体所必须的维生素和矿物质等营养成分, 在全球是仅次于小麦、水稻、玉米之后的第四大粮食作物^[1]。我国农业部提出“推进马铃薯发展和马铃薯主粮化”的举措, 表明开展马铃薯主粮化研究和产业发展, 是成为顺应中国居民不断增长的营养健康需求, 适应中国饮食文化特征的必然趋势^[2]。采后马铃薯块茎在贮藏期间发芽会造成营养物质的流失, 导致贮藏化合物的降解及水分损失, 从而引起表皮收缩, 使其品质下降, 直接影响它的食用价值及商品价值。而发芽的马铃薯块茎会产生有毒物质 α -茄碱, 同样存在食用安全问题^[3]。因此开发具有抑制马铃薯发芽, 延长马铃薯贮藏期的保鲜技术具有十分重要的意义。

国内外生产实践中主要通过低温冷藏(2~4℃)、抑芽剂氯苯胺灵等方法抑制马铃薯发芽, 延长马铃薯贮藏期^[4]。然而, 马铃薯在低温条件下贮藏会发生糖化反应, 会使马铃薯油炸加工的色泽变黑, 同时还会产生丙烯酰胺等潜在致癌的化学物质。此外, 由于人们对食品中残留化学品安全性的担忧, 导致氯苯胺灵的使用一直受到关注^[4]。近年来替代氯苯胺灵的马铃薯采后抑芽方法中, 植物精油以天然、安全、多效应等特点成为抑芽剂和采后保鲜应用的研究热点^[5]。其中CEO因其具有良好的抗菌、抗氧化和驱虫等生物特性而被广泛的应用于食品保鲜和食品防腐等方面^[6]。课题组前期研究中发现, CEO熏蒸处理能够抑制马铃薯发芽、减少马铃薯贮藏期间的重量损失、抑制淀粉降解和还原糖含量的增加, 并在贮藏后期抑制马铃薯块茎中的赤霉素(Gibberellin A₃, GA₃)产生, 降低 α -茄碱的水平, 有效保持了马铃薯贮藏品质^[7]。

活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)是植物正常生命活动或在逆境胁迫时产生的一些氧代谢产物及其衍生物的总称, 已有研究表明, ROS与植物种子萌发和休眠解除有关, 而外源ROS的应用可以诱导打破种子的休眠^[8]。据报道, 马铃薯休眠解除与块茎中超氧阴离子自由基(Superoxide Radical, O₂⁻)和过氧化氢(Hydrogen Peroxide, H₂O₂)的积累有关。而抗氧化酶在维持薯肉ROS的产生与清除平衡中起关键作用^[9]。目前CEO对马铃薯抑芽机制研究主要集中在碳水化合物代谢和激素调节等代谢通路中, 但通过调控活性氧代谢抑制马铃薯发芽之间关联的研究却鲜有

报道。

本研究以CEO处理马铃薯, 解析CEO抑制马铃薯块茎发芽的行为过程中, ROS及相关抗氧化酶在这一重要生理过程中的变化。通过使用CEO调控马铃薯采后贮藏发芽问题, 为提高其商品品质提供技术指导和理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯“内蒙古V7”(150~200g), 购自天津韩家墅农产品批发市场(处于休眠期)。CEO购自中国上海相辉医药科技有限公司。

盐酸羟胺, 天津渤化化学试剂有限公司, 纯度98.5%; 浓硫酸, 永飞化学试剂有限公司, 纯度98.3%; 乙二胺四乙酸, 天津市风船化学试剂科技有限公司, 纯度99.5%; 聚乙烯聚吡啶烷酮(PVPP), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 纯度≥95%; 二硫苏糖醇, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司, 纯度99%; 对氨基苯磺酸, 天津市光复科技发展有限公司, 纯度>99.8%; 核黄素, 天津市光复科技发展有限公司, 纯度>97.5%; 愈创木酚, 北京索莱宝科技有限公司, 纯度≥99%; 亚硝酸钾, 上海麦克林生化科技有限公司, 纯度97%; α -萘胺, 天津市化学试剂一厂, 纯度≥99.2%; 氯化硝基四氮唑蓝, 上海蓝季生物, 纯度>99.2%; 抗坏血酸, 天津市赢达稀贵化学试剂厂, 纯度>99.7%。以上试剂等均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

GXH-3051H型果蔬呼吸测定仪, 北京均方理化有限公司; VersaMax型酶标仪, 上海美谷分子仪器有限公司; Gasin-DH型冷库, 天津捷盛东辉保鲜科技有限公司; Evolution201型紫外分光光度计, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; Testo AG温湿度记录仪, 德国图集团; LOCK聚丙烯塑料箱, 中国上海。

1.3 马铃薯处理方法

用清水清洗马铃薯表面的泥土, 对马铃薯用20 mg/g次氯酸钠浸泡处理3 min, 冲洗马铃薯块茎后, 置于黑暗条件下阴干处理, 然后挑选大小合适、无机械损伤、无病害的马铃薯进行贮藏实验。

CEO 熏蒸方法根据 Jia 等^[7]描述的方法进行了调整。CEO 处理在自制内循环密封箱中进行(图 1)。每个密封箱(21 L)中叠放 36 个马铃薯,精油通过释放装置的加热处理挥发至环境中,然后通过风扇作用在箱内均匀分散。CEO 处理组共六箱,其中三箱做发芽率统计实验,三箱用于取样测定指标。CEO 熏蒸处理组:依据前期研究基础,CEO 熏蒸时间 6 h,精油熏蒸质量浓度约为 6.0 mg/L,每次取样前熏蒸,每 14 d 进行一次取样,熏蒸过程中封住换气孔,熏蒸后 48 h,打开换气孔,换气持续到下次熏蒸,整个过程保持在(20±2)℃的环境中。对照组无 CEO 熏蒸,其余条件与处理组条件相同。马铃薯贮藏期间从第 0 天开始取样,贮藏至第 70 天结束。

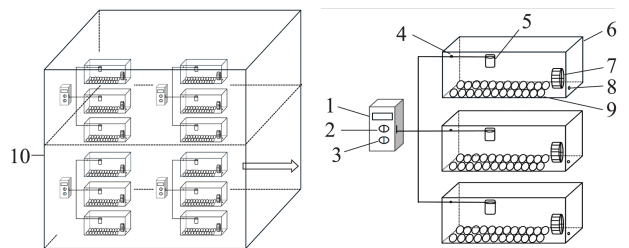


图 1 香茅精油熏蒸马铃薯装置
Fig.1 CEO fumigation potato device

注: 1. 时间显示; 2. 时间控制开关; 3. 电源开关; 4. 接线孔; 5. 精油释放装置; 6. 密封箱; 7. 风扇; 8. 换气孔; 9. 马铃薯; 10. Gasin-DH 冷库。

1.4 指标的测定

1.4.1 发芽率测定

参考 Yang 等^[10]的方法按块茎数进行计算,芽长大于 2 mm,判定发芽。

1.4.2 失重率测定

采用差量法^[10]进行测定。

1.4.3 呼吸强度测定

参考洪伟荣等^[11]的方法,采用 GXH-3051H 红外果蔬呼吸测定仪,测定前记录其样品质量及测定 5 min 前后的 CO₂ 体积分数起始值和终止值,按公式(1)计算,呼吸强度(Respiration Intensity)以 CO₂ mg/(kg·h)表示。

$$B = \frac{44 \times (W_1 - W_2) \times V \times 273}{V_0 \times (273 + T) \times m \times t}$$

(1)

式中:

- B——马铃薯呼吸强度(RI), CO₂ mg/(kg·h);
- W₁——空白试验密闭容器中 CO₂ 体积分数, %;
- W₂——测定后密闭容器中 CO₂ 体积分数, %;
- V——密闭容器内总体积, L;

- M——CO₂ 的摩尔质量, g/mol;
- V₀——测定温度下 CO₂ 摩尔体积, L/mol;
- M——测定用果蔬的质量, kg;
- T——测定时温度, ℃;
- t——测定时果蔬呼吸时间, h。

1.4.4 过氧化氢(H₂O₂)含量的测定

H₂O₂ 的测定是根据 Zhang 等^[12]描述的方法并稍加修改。将 3 g 块茎组织加入到 5.0 mL 预冷的丙酮在冰浴条件下研磨成匀浆,离心后吸取上清液 1.0 mL,加入 0.1 mL 10% 四氯化钛-盐酸溶液和 0.2 mL 浓氨水,反应 5 min,离心弃上清液,向沉淀中加入 3.0 mL 2 mol/L 硫酸,测定混合物在 412 nm 处吸光度值。根据用标准 H₂O₂ 溶液制作的标准曲线计算样品中 H₂O₂ 的浓度,结果以 μmol/g FW。

1.4.5 超氧阴离子自由基(O₂⁻·)产生速率的测定

根据 Liu 等^[8]描述的方法,通过监测羟胺在 O₂⁻ 存在下形成的 NO₂⁻ 来测量。提取缓冲液含有 50 mmol/L 磷酸钠缓冲液(pH 值 7.8), 1 mmol/L EDTA, 0.3% (V/V) Triton-X 和 2% (m/V) 聚乙烯吡啶烷酮(PVPP),反应液在 530 nm 处吸光度值。产生速率根据亚硝酸钾(KNO₂)绘制的标准曲线计算,结果以 μmol·min⁻¹·g⁻¹ FW 表示。

1.4.6 过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性的测定

CAT 活性的测定参考 Yang 等^[10]的方法。酶提取液为 50 mmol/L、pH 值 7.5 提取缓冲液(5 mmol/L DTT 和 5% (m/V) PVPP)。酶促反应体系由 2.9 mL 20 mmol/L H₂O₂ 溶液和 0.1 mL 酶提取液组成。蒸馏水为参比对照,在反应 15 s 时开始记录反应体系在波长 240 nm 处吸光度值。以每分钟吸光度变化值减少 0.01 为 1 个 CAT 活性单位,结果以 U/g 表示。

1.4.7 超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、抗坏血酸过氧化物酶(Ascorbate Peroxidase, APX)活性的测定

根据 Li 等^[13]描述的方法提取粗酶液,所有步骤都在 4 ℃ 下进行。用 5 mL 缓冲液(含有 50 mmol/L pH 值 7.5 磷酸钠缓冲液、1.0 mmol/L EDTA、0.3% (V/V) Triton X-100 和 2% (m/V) 聚乙烯吡咯烷酮)匀浆样品组织(2 g),将提取液以 12 000×g 离心 20 min,收集上清液用于酶活性测定。

根据 Zhou 等^[14]描述的方法测定 SOD 活性。反应体系包括 0.1 mL 酶提取液、50 mmol/L 磷酸缓冲液(pH 值 7.8)、130 mmol/L 蛋氨酸(MET)溶液、0.75 mmol/L 氮蓝四唑(NBT)溶液、0.1 mmol/L

EDTA- Na_2 溶液、0.02 mmol/L 核黄素溶液。SOD 活性的一个单位被定义为在 560 nm 处引起 NBT 还原的 50 % 抑制的酶的量, 结果以 U/g 表示。

使用 Fan 等^[15]描述的方法测定 POD 活性, 并稍作调整。反应体系包括 3 mL 愈创木酚 (25 mmol/L)、0.2 mL H_2O_2 (0.5 mol/L) 和 0.5 mL 酶提取物。以蒸馏水作为空白参考, 以 15 s 的间隔记录反应体系在 470 nm 处的吸光度。一个 POD 活性单位被定义为在 470 nm 处的吸光度每分钟减少 0.01, 结果以 U/g 表示。

用 Xu 等^[16]描述的方法测量 APX 活性, 并稍作调整。反应体系包括 0.1 mL 酶提取液、2.6 mL 50 mmol/L pH 值 7.5 磷酸钠缓冲液 (含有 0.1 mmol/L EDTA 和 0.5 mmol/L 抗坏血酸) 和 0.3 mL 2 mmol/L H_2O_2 。以蒸馏水作为空白参比, 以 15 s 的间隔记录 290 nm 处的吸光度。一个 APX 活性单位被定义为在 290 nm 处的吸光度每分钟减少 0.01, 结果以 U/g 表示。

1.5 数据分析

实验结果均已平均值 $\pm$ 标准差表示, 数据采用 SPSS 22.0 单因素方差分析, $P < 0.05$ 具有显著性差异, 在 Origin 2021 软件进行分析和绘图。

2 结果与讨论

2.1 香茅精油处理对马铃薯发芽率的影响

发芽会影响马铃薯的重量、营养成分以及块茎的品质, 这在马铃薯贮藏过程中会导致严重的经济损失^[3]。CEO 处理对马铃薯贮藏过程中发芽率的影响如图 2 所示。随着贮藏时间的增加, 对照组马铃薯的发芽率在逐渐升高, 在第 56 天发芽率达到 100.00 %, 而 CEO 处理组在 70 d 的贮藏期间未出现发芽现象。

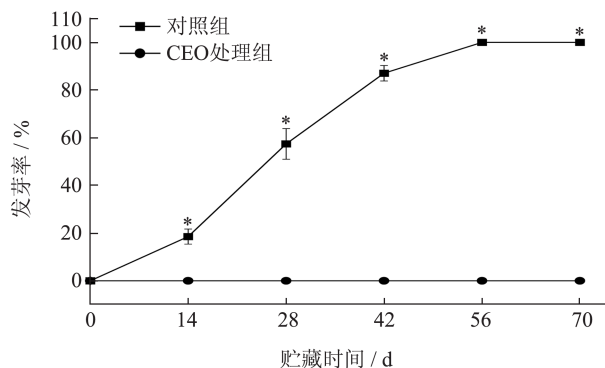


图 2 香茅精油处理对马铃薯发芽率的影响

Fig.2 Effect of CEO treatment on germination rate of potato tubers

注: * 代表对照组马铃薯与 CEO 处理马铃薯每次之间的显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

进一步对马铃薯芽眼结构进行观察, 发现对照组马铃薯芽眼处出现发芽现象, 芽眼萌芽呈短粗状和紫青色, 而 CEO 处理组马铃薯芽眼处则呈黑色块状, 未出现明显的萌芽现象 (图 3), 原因可能是 CEO 处理在马铃薯萌芽阶段破坏了芽组织^[17], 抑制了马铃薯发芽。袁丽雪^[5]使用 15 种精油和 3 种抑芽剂对马铃薯进行抑芽效果研究, 同样发现 CEO 处理对马铃薯具有抑芽效果。结果表明, CEO 处理可以显著 ($P < 0.05$) 抑制马铃薯的发芽。



图 3 香茅精油处理组与对照组第 56 天马铃薯芽眼照片
Fig.3 Potato sprout eye photos of citronella essential oil treatment group and control group on the 56th day

2.2 香茅精油处理对马铃薯失重率的影响

马铃薯作为果蔬生命个体, 在贮藏的过程中仍然会进行着基本的代谢活动, 同时由于自身呼吸及表面蒸腾作用的影响, 导致马铃薯在贮藏过程中重量逐渐减少^[18]。CEO 处理对马铃薯贮藏过程中失重率的影响如图 4 所示。随着贮藏时间增加, 对照组和 CEO 处理组马铃薯失重率均在不断增加, 28 d 前 CEO 处理组失重率低于对照组但不存在显著差异, 在 42 d 后 CEO 处理组马铃薯的失重率显著 ($P < 0.05$) 低于对照组。贮藏到 70 d 时, 对照组和 CEO 处理组失重率分别为 3.21% 和 1.98%, 原因是因为对照组马铃薯休眠解除, 消耗大量营养物质以满足马铃薯发芽能量所需, 而 CEO 处理组马铃薯发芽被抑制, 降低了营养物

质消耗。李金洋等^[18]采用油樟精油处理马铃薯, 同样出现油樟精油处理组马铃薯发芽被抑制且失重率显著低于对照组的结果。结果表明, CEO 处理可以降低马铃薯贮藏期间的失重率, 维持其贮藏品质。

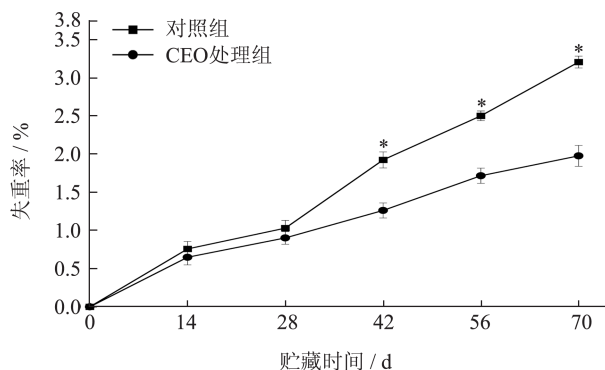


图4 香茅精油处理对马铃薯失重率的影响

Fig.4 Effect of CEO treatment on weight loss rate of potato tubers

2.3 香茅精油处理对马铃薯呼吸强度的影响

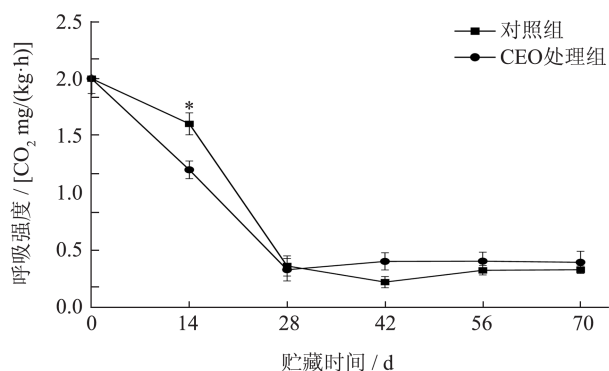


图5 香茅精油处理对马铃薯呼吸强度的影响

Fig.5 Effect of CEO treatment on respiratory intensity of potato tubers

呼吸强度是果蔬代谢能力强弱的重要指标, 采后马铃薯块茎仍然是一个活的有机体, 通过呼吸作用维持着生理代谢活动^[19]。CEO 处理对马铃薯贮藏过程中呼吸强度的影响如图5所示。马铃薯块茎开始贮藏时呼吸强度最高为2.00 CO₂ mg/(kg·h), 随着马铃薯贮藏时间的延长, 对照组与CEO处理组马铃薯呼吸强度均快速下降, 这可能因为贮藏开始前对马铃薯块茎的搬运挑拣使块茎之间相互挤压碰撞, 导致0 d的呼吸强度最高, 当损伤逐渐愈合后呼吸强度会快速下降^[19]。贮藏14 d前CEO处理组呼吸强度下降速率是对照组的1.50倍, 与对照组具有显著差异 ($P < 0.05$), 原因可能是因为对照组马铃薯处于萌芽状态, 休眠逐渐被打破, 呼吸强度较休眠状态开始逐渐变强, 而CEO处理组马铃薯仍处于休眠状态, 从而贮藏前期呈现CEO抑制马铃薯呼吸强度现象。贮藏42 d后对照组已发芽

的马铃薯呼吸强度低于处理组马铃薯的可能原因是对照组营养物质消耗过快不能为呼吸提供充分能量引起的^[20]。代红飞^[21]与赵双^[22]均发现抑芽处理的马铃薯呼吸强度高于发芽马铃薯的现象。结果表明, CEO处理可以降低贮藏前期马铃薯的呼吸强度。

2.4 香茅精油处理对马铃薯H₂O₂含量的影响

马铃薯块茎休眠的调节除了受到顶端优势和植物激素的影响外, 还受氧化应激反应的影响^[23]。引起氧化应激反应的ROS在马铃薯休眠过程中作为细胞信使引起块茎芽的破裂, 加速休眠打破。研究表明H₂O₂积累与马铃薯的休眠解除有关^[8]。CEO处理对马铃薯贮藏过程中H₂O₂含量的影响如图6所示。对照组马铃薯14 d时H₂O₂含量快速上升, 达到17.71 mmol/g FW, 原因可能是为加速马铃薯休眠的打破, 在贮藏前期H₂O₂出现短暂显著增加^[9]。随着贮藏时间的增加, 对照组马铃薯H₂O₂含量总体呈上升趋势, 第70天达到最大值25.55 mmol/g FW。而CEO处理组马铃薯H₂O₂含量在贮藏前期呈现缓慢上升的趋势, 14 d时CEO处理组马铃薯H₂O₂含量为10.48 mmol/g FW, 仅比第0天增加了0.20 mmol/g FW, 第56天达到最大值16.14 mmol/g FW。与对照组相比, CEO处理组马铃薯H₂O₂含量整体低于对照组。结果表明, CEO处理抑制马铃薯贮藏过程中H₂O₂含量的增加, 减少ROS的积累。

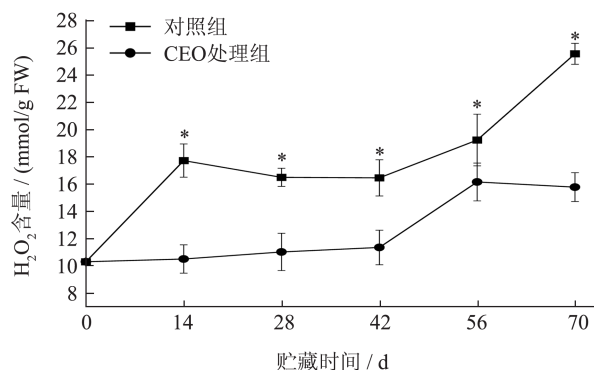


图6 香茅精油处理对马铃薯中H₂O₂含量的影响

Fig.6 Effect of CEO treatment on Hydrogen peroxide content of potato tubers

2.5 香茅精油处理对马铃薯中O₂⁻产生速率的影响

CEO处理对马铃薯贮藏过程中O₂⁻产生速率如图7所示。对照组马铃薯中O₂⁻产生速率在14 d之前迅速上升, 并达到峰值(8.58 μmol·min⁻¹·g⁻¹ FW), 在贮藏28 d后保持相对稳定的水平, 原因可能是贮藏前期为加速马铃薯休眠的打破, 提高ROS的积累^[24]。

Liu 等^[8]通过 NBT 和 DBA 对休眠和发芽的块茎分生组织复合体进行染色研究发现,马铃薯发芽过程中块茎要比休眠块茎中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率要高,说明 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率与马铃薯萌芽有关。CEO 处理组的马铃薯块茎 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率在整个贮藏期间呈现较低水平,同时处理组 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率整体低于对照组,可能与 CEO 对 $O_2^{\cdot-}$ 具有清除能力有关^[25]。田雨晴^[26]研究发现茶树精油处理鲜切菠萝可抑制 ROS 累积,有效维持鲜切菠萝品质。本研究结果表明,CEO 熏蒸可降低马铃薯 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、抑制 ROS 含量的升高,从而延长其贮藏品质。

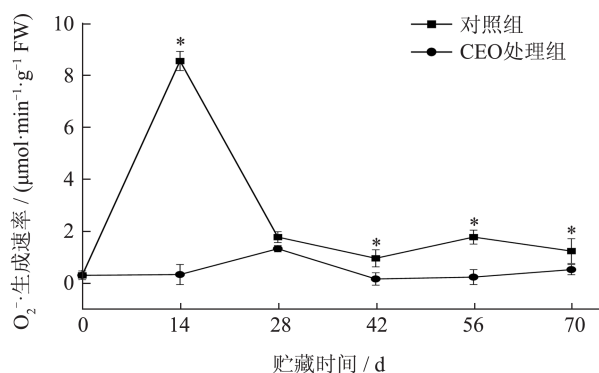


图7 香茅精油对马铃薯中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率的影响

Fig.7 Effect of CEO treatment on the $O_2^{\cdot-}$ production rate of potato tubers

2.6 香茅精油处理对马铃薯CAT活力的影响

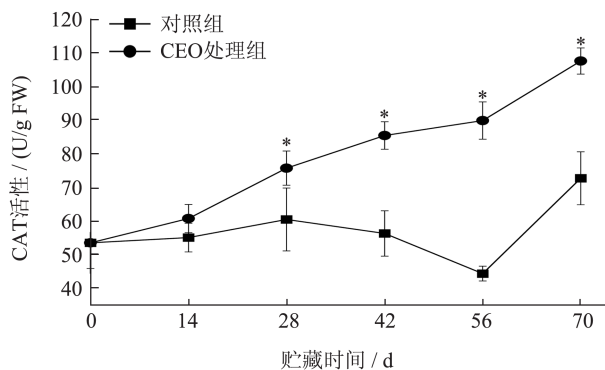


图8 香茅精油处理对马铃薯中 CAT 活力的影响

Fig.8 Effect of CEO treatment on CAT activities of potato tubers

为清除和稳定 ROS 含量,植物在长期进化过程中形成完善的 ROS 防卫系统,包括有酶促系统与非酶促系统,酶促系统包括 SOD、CAT、POD 及 APX 等^[27]。其中 CAT 在植物中可催化 H_2O_2 分解成 O_2 和 H_2O 降低 ROS 积累^[10]。CEO 处理对马铃薯贮藏过程中 CAT 活力的影响如图 8 所示。对照组马铃薯 CAT 活性总体呈现先上升后下降再上升的趋势,李子和等^[9]用复配精油纳米乳处理马铃薯块茎也出现类似的结果。在第 56 天对

照组马铃薯 CAT 活性降到最低值 44.17 U/g FW,可能是因为马铃薯块茎 ROS 的迅速积累导致 CAT 活性的下降^[8]。不同的是,CEO 处理组马铃薯的 CAT 活性呈现一直上升的趋势,第 70 天 CEO 处理组马铃薯 CAT 活性达到最大值 107.44 U/g FW,比对照组 CAT 活性提高了 32.48%,且 CEO 处理组 CAT 活性高于对照组显著 ($P < 0.05$),说明 CEO 处理可以提高马铃薯中 CAT 活性。

2.7 香茅精油处理对马铃薯SOD活力的影响

SOD 是一种抗氧化金属蛋白,可将 $O_2^{\cdot-}$ 歧化成 O_2 和 H_2O_2 ,从而避免 ROS 积累^[27]。CEO 处理对马铃薯贮藏过程中 SOD 活性的影响如图 9 所示。随着贮藏时间的增加,CEO 处理组和对照组 SOD 活性呈现一直上升的趋势,第 70 天均达到最大值,分别为 0.90 U/g FW 和 0.82 U/g FW。在贮藏期间,CEO 处理组和对照组马铃薯 SOD 活性整体不存在显著差异。有研究表明 ROS 可作为信号分子诱导 SOD 基因表达^[28],结合 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率与 H_2O_2 含量变化猜测,对照组马铃薯贮藏过程中发芽,ROS 含量快速上升,诱导 SOD 基因表达,提高 SOD 活性,而处理组 SOD 活性上升可能是 CEO 作用导致。Vasileios 等^[29]研究发现乳香油及其主要成分显著上调 SOD 等编码基因,提高抗氧化酶活性,表明植物精油可通过信号传导,提高抗氧化酶活性。CEO 提高 SOD 活性机理还需要进一步研究。

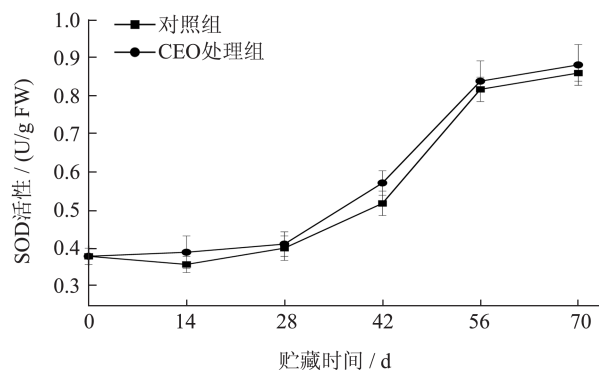


图9 香茅精油处理对马铃薯 SOD 活力的影响

Fig.9 Effect of CEO treatment on SOD activities of potato tubers

2.8 香茅精油对马铃薯中POD活性的影响

POD 是一类氧化还原酶,可与 CAT、APX 协同作用抑制 H_2O_2 含量的积累,减缓 ROS 含量的增加^[9]。CEO 处理对马铃薯贮藏过程中 POD 活性的影响如图 10 所示。对照组和 CEO 处理组 POD 活性均呈现先上升后下降的趋势,且 POD 活性均在第 28 天的时候达到最大值,分别为 58.42 U/g FW 和 72.29 U/g FW。对照组马铃薯 POD 活性在 28 d 前快速上升的原因是

为清除自由基的快速积累,避免芽体受到损伤^[30],28 d后 POD 活性迅速下降的原因可能是因为马铃薯休眠解除导致^[18]。而 CEO 处理组在第 28 天后出现下降但马铃薯块茎仍处于休眠状态,原因可能是因为马铃薯块茎在贮藏过程中 CAT、POD、APX 之间存在相互调节作用^[27]。从图 7、图 10 可以发现,CEO 处理组马铃薯在 28 d 后 CAT、APX 活性提高,抗氧化酶整体清除 H₂O₂ 能力提高,因此出现 POD 活性下降现象。与对照组相比,CEO 处理组马铃薯 POD 总体保持较高的活性,表明 CEO 熏蒸可以提高马铃薯中 POD 活性。

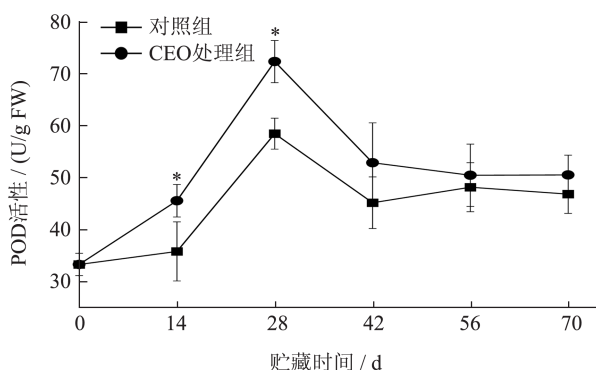


图 10 香茅精油处理对马铃薯 POD 活性的影响

Fig.10 Effect of CEO treatment on POD activities of potato tubers

2.9 香茅精油处理对马铃薯APX活性的影响

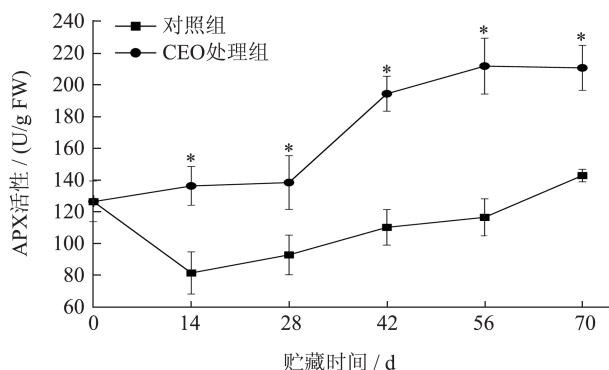


图 11 香茅精油处理对马铃薯 APX 酶活性的影响

Fig.11 Effect of CEO treatment on APX activities of potato tubers

APX 与 CAT、POD 具有协同作用,可将 H₂O₂ 还原成 H₂O,避免 ROS 积累^[27]。CEO 处理对马铃薯贮藏过程中 APX 活力的影响如图 11 所示。贮藏初期对照组 APX 活性下降,14 d 后开始上升,第 70 天对照组 APX 活性达到最大值 151.89 U/g FW,Delaplace 等^[31]利用非变性聚丙烯酰胺凝胶电泳研究在 20 ℃ 条件下贮藏的马铃薯抗氧化酶活性变化,同样发现 APX 活性在贮藏初期发生降低,然后逐渐升高的现象。

CEO 处理组 APX 活性总体呈现上升趋势,56 d 达到最大值 211.67 U/g FW,贮藏结束的第 70 天,CEO 处理组 APX 活性比对照组提高了 47.47%,且 CEO 处理组的整体活性显著 ($P<0.05$) 高于对照组。研究表明,ROS 可打破种子休眠期,促进种子发芽,APX 可清除过量 ROS 抑制马铃薯、大麦、水稻等发芽^[32]。结果表明,CEO 处理可以显著提高马铃薯中 APX 活性。

3 结论

综上所述,随着马铃薯贮藏时间的增加,CEO 处理可降低马铃薯块茎发芽率、失重率,抑制块茎的呼吸强度;同时降低块茎 H₂O₂ 含量和 O₂⁻ 产生速率,并提高 CAT、SOD、POD、APX 活性。由此可知,CEO 处理可通过调节马铃薯块茎抗氧化酶的活性,降低 ROS 含量,达到抑制马铃薯发芽、延长马铃薯贮藏期的目的。因此,CEO 作为一种天然、安全的马铃薯抑芽物质,在提高马铃薯块茎贮藏品质方面具有很大的潜力。

参考文献

- [1] AFIFY A, HOSSAM S, ALY A, et al. Antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation as biomarker for potato tuber stored by two essential oils from caraway and clove and its main component carvone and eugenol [J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2012, 2(2): S772-S780.
- [2] 卢肖平.马铃薯主粮化战略的意义、瓶颈与政策建议[J].华中农业大学学报(社会科学版),2015,3:1-7.
- [3] OWOLABI M S, OLOWU R A, LAJIDE L, et al. Inhibition of potato tuber sprouting during storage by the controlled release of essential oil using a wick application method [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 45(11): 83-87.
- [4] MURIGI W W, NYANKANGA R O, SHIBAIRO S I. Effect of storage temperature and postharvest tuber treatment with chemical and biorational inhibitors on suppression of sprouts during potato storage [J]. Journal of Horticultural Research, 2021, 29(1): 83-94.
- [5] 袁丽雪.植物精油对马铃薯的抑芽作用研究及其水凝胶的制备和应用[D].济南:齐鲁工业大学,2023.
- [6] 李海明,吴水金,李跃森.香茅精油的生物活性及其在果蔬中的应用[J].安徽农学通报,2022,28(5):123-125.
- [7] JIA B, XU L, GUAN W Q, et al. Effect of citronella essential oil fumigation on sprout suppression and quality of potato tubers during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 284(1): 254-258.
- [8] LIU B, ZHAO S, TAN F, et al. Changes in ROS production and antioxidant capacity during tuber sprouting in potato [J]. Food Chemistry, 2017, 237(5): 205-213.
- [9] 李子和,夏洪斌,张忠,等.复配精油纳米乳雾化处理对马铃薯发芽的抑制作用及机理探讨[J].食品与发酵工业,2021,47(2):30-37.
- [10] YANG X N, AN J T, WANG X Y, et al. Ar plasma jet treatment delay sprouting and maintains quality of potato tubers (*Solanum*

- tuberosum* L.) by enhancing antioxidant capacity [J]. Food Bioscience, 2023, 51(10): 102145.
- [11] 洪伟荣,王璇,刘馨岚,等.1-MCP预处理对采后猕猴桃机械损伤导致品质变化的影响[J].保鲜与加工,2021,21(2):7-12.
- [12] ZHANG Y X, MA Y L, GUO Y Y, et al. Comprehensive insight into the chlorophyll degradation mechanism of postharvest broccoli heads under elevated O₂ controlled atmosphere [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288(11): 110395.
- [13] LI Z, ZHANG W, LI X, et al. Combined effects of 1-methylcyclopropene and tea polyphenols coating treatment on the postharvest senescence and reactive oxygen species metabolism of bracken (*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 185(11): 111813.
- [14] ZHOU Q, MA C, CHENG S, et al. Changes in antioxidative metabolism accompanying pitting development in stored blueberry fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88(10): 88-95.
- [15] FAN X J, ZHANG B, YAN H, et al. Effect of lotus leaf extract incorporated composite coating on the postharvest quality of fresh goji (*Lycium barbarum* L.) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 148(10): 132-140.
- [16] XU F, ZHANG K, LIU S. Evaluation of 1-methylcyclopropene (1-MCP) and low temperature conditioning (LTC) to control brown of huangguan pears [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 259(10): 108738.
- [17] 袁丽雪,赵愉涵,孙斐,等.香茅精油处理对马铃薯的抑芽作用研究[J].食品与发酵工业,2022,48(23):256-263.
- [18] 李金洋,龚殊,杨丹宁,等.油樟精油对马铃薯发芽的影响[J].中国马铃薯,2022,36(4):341-349.
- [19] 葛霞,任娜,黄铮,等.3种抑芽剂对马铃薯贮藏效果的影响[J].甘肃农业科技,2018,12:46-52.
- [20] 田甲春,田世龙,程建新,等.马铃薯贮藏期间呼吸强度与营养品质的变化[C]//马铃薯产业与精准扶贫2017.毕节:甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所,2017: 397-402
- [21] 代红飞.外源乙烯对马铃薯抑芽机制的研究及加工品质的影响[D].济南:齐鲁工业大学,2016.
- [22] 赵双.外源乙烯对马铃薯发芽的抑制作用及其机理研究[D].济南:齐鲁工业大学,2014.
- [23] DOGRAMACI M, DOBRY E P, FORTINI E, et al. Physiological and molecular mechanisms associated with potato tuber dormancy [J]. Journal of Experimental Botany, 2024, 75(19): 6093-6109.
- [24] GOMES M P, GARCIA Q S. Reactive oxygen species and seed germination [J]. Biologia, 2013, 68(3): 351-357.
- [25] 杨辉祥,黄小芹,潘磊,等.香茅精油的抑菌和抗氧化活性研究[J].亚热带植物科学,2021,50(2):92-95.
- [26] 田雨晴.湿度响应型精油凝胶珠的制备及其对鲜切菠萝品质的调控机制[D].南昌:南昌大学,2024.
- [27] 高媛,薛艳红,刘士平.植物抗氧化动态平衡研究进展[J].生物资源,2019,41(1):14-21.
- [28] YAN W, NIU Y X, YE L X, et al. Ozone treatment modulates reactive oxygen species levels in kiwifruit through the antioxidant system: insights from transcriptomic analysis [J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 291(15): 154135.
- [29] VASILEIOS X, ELENI F, GEORGIAPERSEPHONI V, et al. Antioxidant and cytoprotective potential of the essential oil *Pistacia lentiscus* var. *chia* and its major components myrcene and α -pinene [J]. Antioxidants, 2021, 10 (1): 127-127.
- [30] 钟蕾,邓俊才,王良俊,等.生长调节剂处理对马铃薯贮藏期萌发及氧化酶活性的影响[J].草业学报,2017,26(7):147-157.
- [31] DELAPLACE P, ROJAS-BELTRAN J, FRETTEINGER P, et al. Oxylipin profile and antioxidant status of potato tubers during extended storage at room temperature [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2008, 46(12): 1077-1084.
- [32] 方涛,董艳苹,李亚楠,等.水稻叶绿体抗坏血酸过氧化物酶在干旱和高盐胁迫中的作用[J].植物生理学报,2015,51(12):2207-2213.