

网络出版时间:2019-04-01 15:19 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2019.10.014
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20190401.1518.028.html

贮藏温度对白菜叶片 SOD、POD 活性及 MDA 含量的影响

张 杰¹, 孙叶烁¹, 薛一花¹, 陈 霖¹, 张鲁刚¹, 方智远^{1,2}

(1 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100; 2 中国农业科学院 蔬菜花卉研究所, 北京 100000)

【摘 要】【目的】研究白菜叶片在不同贮藏温度下超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性及丙二醛(MDA)含量的变化特点。【方法】以白菜品种紫衣、百慕田和 947-5s 为供试材料,将白菜叶片在不同温度下贮藏不同时间(4℃下贮藏 0,3,5,8 和 10 d; -40,-80℃下贮藏 0,12,24,48 和 72 d),测定 SOD、POD 活性及 MDA 含量。【结果】不同品种叶片的 SOD 活性明显不同。4℃贮藏条件下,紫衣、百慕田和 947-5s SOD 活性表现相同的变化趋势,即冷藏 0~5 d 和 8~10 d 活性变化不大,冷藏 5~8 d SOD 活性明显增大,8 d 时 SOD 活性较 5 d 时分别提高了 62.28%,74.83%和 61.96%;-40,-80℃两种冻藏温度下,SOD 活性均表现为升高-降低-上升的变化趋势。不同品种叶片的 POD 活性明显不同。4℃贮藏条件下,紫衣、百慕田和 947-5s POD 活性都表现先下降再上升趋势,在冷藏第 3 天降到最低值,较 0 d 分别下降了 42.64%,18.16%和 11.4%,3~10 d POD 活性逐渐上升,10 d 时的 POD 活性分别为 0 d 的 1.10,1.49 和 2.14 倍;在两种冻藏温度下 3 个品种 POD 活性都呈现下降-上升-下降趋势,且品种间 POD 活性变化较大。3 个白菜品种鲜叶片的 MDA 含量明显不同。4℃贮藏条件下,947-5s 和百慕田 MDA 含量呈逐渐升高趋势,紫衣则为逐渐降低趋势。在-40,-80℃条件下,紫衣 MDA 含量都呈现下降-上升-下降-上升的波浪式趋势;-40℃条件下 947-5s 和百慕田 MDA 含量呈现上升-下降-上升相同趋势;-80℃条件下 947-5s MDA 含量呈现升高-降低-上升-降低趋势,而百慕田 MDA 含量无明显变化。【结论】3 个白菜品种鲜叶片 SOD、POD 活性和 MDA 含量各不相同。3 个白菜品种叶片只有 SOD 的活性在 4℃冷藏 0~5 d 时有平稳期,而 POD 活性及 MDA 含量在冷、冻藏条件下都会随着时间延长而变化。

【关键词】白菜贮藏;超氧化物歧化酶;过氧化物酶;丙二醛

【中图分类号】S634.09⁺3

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2019)10-0113-07

Effects of storage temperature on SOD and POD activities and MDA contents in Chinese cabbage leaves

ZHANG Jie¹, SUN Yeshuo¹, XUE Yihua¹, CHEN Lin¹,

ZHANG Lugang¹, FANG Zhiyuan^{1,2}

(1 College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: 【Objective】The changes in activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) and malondialdehyde (MDA) contents of Chinese cabbage leaves under different storage temperatures were studied. 【Method】SOD and POD activities and MDA contents in leaves of Chinese Cabbage varieties (Ziyi, Baimutian and 947-5s) were detected and analyzed at different storage times and temperatures (4℃ for 0, 3, 5, 8 and 10 d; -40 and -80℃ for 0, 12, 24, 48 and 72 d). 【Result】SOD activities in leaves of different

【收稿日期】2018-09-15

【基金项目】国家重点研发计划项目(2016YFD0101701);陕西省蔬菜产业体系项目

【作者简介】张 杰(1993-),女,山东潍坊人,硕士,主要从事蔬菜育种与生物技术研究。E-mail:1092732243@qq.com

【通信作者】方智远(1939-),男,湖南衡阳人,教授,博士,院士,主要从事甘蓝遗传育种研究。E-mail:mengyf@mail.caas.net.cn

varieties were significantly different. Under 4 °C, SOD activities in all varieties showed the same trend with no significant change at 0–5 d and 8–10 d but significant increase at 5–8 d. SOD activities at 5–8 d were increased by 62.28%, 74.83% and 61.96% for the three varieties compared with those at 5 d. Under –40 and –80 °C, SOD activities showed the increase-decrease-increase trend. POD activities were also different among varieties. Under 4 °C, POD activities of all varieties showed decrease-increase trend. The lowest values at 3 d were 42.64%, 18.16% and 11.4% lower compared with that at 0 d. POD activities gradually increased on 3–10 d. At 10 d, POD activities were 1.10, 1.49 and 2.14 times of those at 0 d. Under –40 and –80 °C, POD activities of all varieties showed a decrease-increase-decrease trend with significant differences among varieties. MDA contents in leaves were significantly different among varieties. Under 4 °C, MDA contents in 947-5s and Baimutian showed a gradually upward trend, while that in Ziyi had a downward trend. Under –40 and –80 °C, MDA content in Ziyi showed a decrease-increase-decrease-increase trend. Under –40 °C, MDA contents in 947-5s and Baimutian showed increase-decrease-increase trend. Under –80 °C, MDA content of 947-5s showed an increase-decrease-increase-decrease trend, while that of Baimutian had no change. 【Conclusion】 The activities of SOD and POD and contents of MDA were different in fresh leaves of the three Chinese cabbage varieties. Activities of SOD were not significantly changed for 0–5 d under 4 °C, while POD activities and MDA content changed over time under cold and frozen conditions.

Key words: Chinese cabbage storage; superoxide dismutase; peroxidase; malondialdehyde

大白菜(*Brassica campestris* syn. *rapa* L. ssp. *pekinensis*)属于十字花科芸薹属蔬菜,原产中国,又称“结球白菜”、“包心白菜”、“黄芽白”、“胶菜”等,栽培历史非常悠久,品种资源十分丰富,是目前我国栽培面积最大的蔬菜作物之一^[1-2]。

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD),别名肝蛋白,是生物体内普遍存在的一种参与氧代谢的含金属的酶。SOD具有特殊的生理活性,是生物体内清除有害自由基的首要物质^[3-4],其活性高低是表征生物体衰老、死亡和抗逆性的直观指标。过氧化物酶(POD)是一种普遍存在于果蔬体内且活性较高的氧化还原保护酶^[5],与植物的呼吸作用、光合作用、生长素氧化以及木质素的形成等有关,其活性随着植物生长发育进程以及环境条件的改变而变化。POD与果蔬产品的变色与变味以及许多生理生化代谢过程密切相关^[6],在加工贮藏过程中其活性会随着不同外界刺激条件的改变而变化。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化最重要的产物之一^[7],它的产生能加剧生物膜(主要是细胞质膜)结构和功能的损伤,进而改变膜的通透性,从而影响一系列生理生化反应的正常进行^[8]。因此MDA含量是研究植物衰老生理和抗性生理中的常用指标,可通过MDA了解膜脂过氧化的程度,从而间接反映膜系统受损程度以及植物的抗逆性^[9]。

SOD、POD及MDA作为反映植物细胞代谢重

要的生理生化指标,已广泛应用于白菜抗病、抗逆、生长发育等研究中^[5,10-11],但关于在不同贮藏温度和贮藏时间下白菜SOD、POD及MDA指标的变化情况未见报道。本研究以性状差异明显的3个白菜品种叶片为试材,研究了在4,–40和–80 °C下贮藏不同时间白菜叶片中SOD、POD活性及MDA含量的变化情况,旨在了解白菜叶片在不同温度贮藏下的3个生理生化指标的变化规律,为白菜速冻保藏及低温保藏提供理论依据,也为批量分析大白菜相关指标时的样品保存及测定提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

性状差异明显的‘紫衣’大白菜、娃娃菜‘百慕田’和秋大白菜‘947-5s’,均来自西北农林科技大学园艺学院十字花科蔬菜遗传改良与生物技术实验室。

SOD提取液(0.05 mol/L,含10 g/L聚乙烯吡咯烷酮(PVP)的PBS)、130 mmol/L甲硫氨酸溶液、750 mol/L氯化硝基四氮唑蓝(NBT)溶液、20 mol/L核黄素溶液、100 mol/L EDTA-Na₂溶液、100 g/L三氯乙酸(TCA)溶液、6 g/L硫代巴比妥酸(TBA)溶液、1 g/L愈创木酚、50 g/L偏磷酸,均购自陕西杨凌宏力化玻站。

主要仪器有TP-A4500电子天平、Thermo nan-

odrop 2000c 超微量紫外分光光度计、HC-3018R 高速冷冻离心机、IMS-85 雪科全自动雪花制冰机。

1.2 试验设计

植株幼苗期于早晨 08:00 取样,将同一材料的叶片剪碎,混匀,称取 0.5 g 为一个混样,进行不同贮藏处理,4 ℃ 下贮藏 0,3,5,8 和 10 d,−40 和 −80 ℃ 下贮藏 0,12,24,48 和 72 d,重复 3 次。冻藏样品于 4 ℃ 解冻后进行各种指标的测定^[12]。

1.3 超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定

1.3.1 酶液提取 称取白菜叶片 0.5 g 于预冷研钵中,加 2 mL 预冷的 0.05 mol/L 含 10 g/L PVP 的 PBS(pH=7.8)在冰浴中研磨成匀浆,转移到 10 mL 容量瓶,用提取介质冲洗并定容到 10 mL。取 5 mL 提取液,于 4 ℃ 条件下 5 000 r/min 离心 20 min,所得上清液即为 SOD 提取液。

1.3.2 活性测定 取 16 个 10 mL 试管,分别加入 pH 为 7.8 的 PBS 缓冲液 1.5 mL、130 mmol/L Met 溶液 0.3 mL、750 mol/L NBT 溶液 0.3 mL、100 mol/L EDTA-Na₂ 溶液 0.3 mL、20 mol/L 核黄素溶液 0.3 mL、粗酶液 0.1 mL,其中一支离心管加入核黄素后立即用锡箔纸套遮光作为暗对照,以不加酶液处理为光对照,最后用蒸馏水配平至 10 mL。全部试剂加完后摇匀,将试管置于 4 000 lx 荧光灯下显色反应 5 min,反应结束后用黑布遮盖终止反应,以暗对照调零,用紫外分光光度计在 560 nm 下测定各处理反应液的吸光值^[13-14]。参考文献[15]计算 SOD 活性(单位为 U/(g·h))。

1.4 过氧化物酶(POD)活性的测定

1.4.1 酶液提取 称取 0.5 g 白菜叶片,加入适量石英砂、CaCO₃、蒸馏水冰浴匀浆,蒸馏水定容至 50 mL,摇匀后 4 ℃ 条件下 4 000 r/min 离心 30 min,取上清液待测。

1.4.2 活性测定 取 20 mL 具塞试管,加入酶液 1.0 mL、1 g/L 愈创木酚 1.0 mL、蒸馏水 6.9 mL,摇匀,加入体积分数 0.18% H₂O₂ 1.0 mL(空白管用 1.0 mL 蒸馏水代替),摇匀计时,25 ℃ 下准确反应 10 min,加 50 g/L 偏磷酸 0.2 mL 终止反应。用蒸馏水调零,用紫外分光光度计测定 470 nm 下各处理反应液吸光值^[16-18]。参考文献[15]计算 POD 活性(单位为 μg/(g·min))。

1.5 丙二醛(MDA)含量的测定

1.5.1 提 取 取剪碎白菜叶片 0.5 g,加入少量 100 g/L TCA 和少量石英砂,研磨至匀浆,再用 100 g/L TCA 定容至 10 mL。取 5 mL 匀浆液于 4 ℃ 条

件下 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液即为 MDA 提取液。

1.5.2 含量测定 吸取 MDA 提取液 2 mL,空白对照用等量蒸馏水代替,加入 2 mL 6 g/L TBA 溶液,摇匀后置于沸水浴中煮沸 15 min。然后迅速冷却后再于 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液,分别在 532,600 和 450 nm 处测定吸光值^[19]。参考文献[15]计算 MDA 含量(单位为 μmol/g)。

1.6 数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 录入整理,并采用 Origin 8.5 进行做图。每组试验重复 3 次,结果用 3 次试验的平均值表示。

2 结果与分析

2.1 冷藏温度下白菜叶片 SOD、POD 活性和 MDA 含量变化

2.1.1 SOD 活性 由图 1 可见,4 ℃ 冷藏条件下,紫衣、百慕田和 947-5s 3 个白菜品种叶片 SOD 活性变化趋势相同,其活性从大到小为 947-5s>紫衣>百慕田。冷藏 0~5 d 内,各品种 SOD 活性变化不大;冷藏 5~8 d,SOD 活性迅速上升,紫衣、百慕田和 947-5s 8 d 时的 SOD 活性较 5 d 时分别提高了 62.28%,74.83%和 61.96%;8~10 d,SOD 活性稳定在较高水平,变化不大。

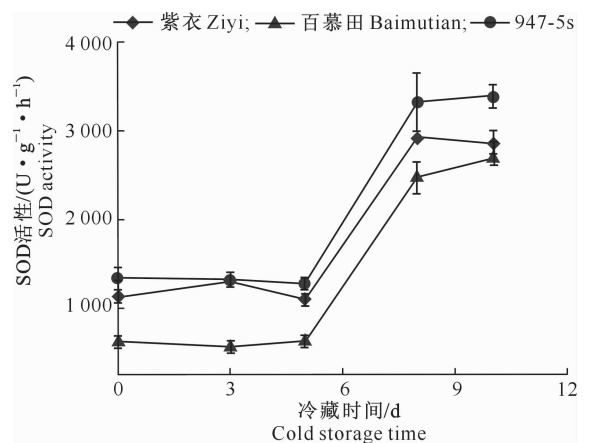


图 1 4 ℃ 冷藏条件下白菜叶片 SOD 活性的变化
Fig. 1 Changes of SOD activities in Chinese cabbage leaves at 4 ℃

2.1.2 POD 活性 由图 2 可见,百慕田和紫衣鲜样的 POD 活性均高于 947-5s;3 个白菜品种叶片 POD 活性变化趋势相同,但品种间 POD 活性差异明显,在冷藏期间 POD 活性一直是百慕田>紫衣>947-5s,其中冷藏 0~3 d,POD 活性逐渐下降,第 3 天到达最低值,较 0 d 分别降低了 42.64%,18.16%

和 11.4%；3~10 d POD 活性逐渐上升,10 d 时 POD 活性分别是 0 d 的 1.10,1.49,2.14 倍,但本试验结果未达到平台期。

2.1.3 MDA 含量 由图 3 可见,3 个白菜品种叶片鲜样的 MDA 含量明显不同,表现为紫衣>947-

5s>百慕田,紫衣白菜 MDA 含量远高于百慕田和 947-5s。随着冷藏时间的延长,紫衣白菜 MDA 含量呈现持续下降趋势,百慕田和 947-5s MDA 含量呈现缓慢上升趋势。

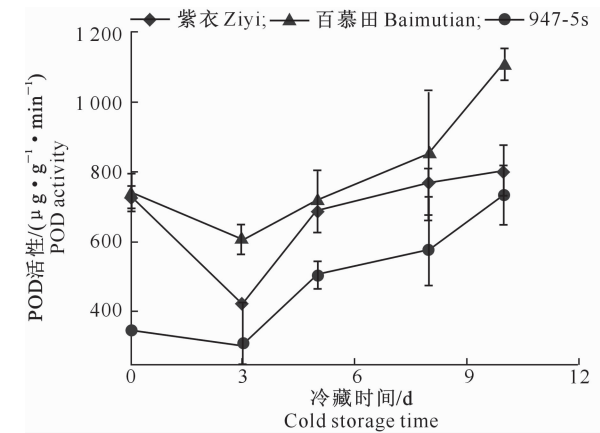


图 2 4 °C 冷藏条件下白菜叶片 POD 活性的变化
Fig. 2 Changes of POD activities in Chinese cabbage leaves at 4 °C

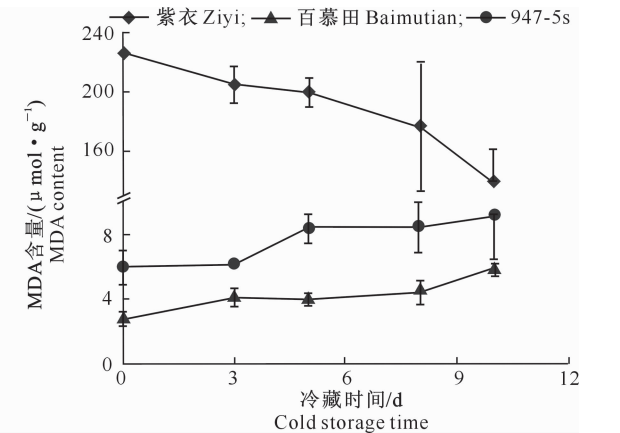


图 3 4 °C 冷藏条件下白菜叶片 MDA 含量的变化
Fig. 3 Changes of MDA contents in Chinese cabbage leaves at 4 °C

2.2 冻藏温度下白菜叶片 SOD、POD 活性和 MDA 含量变化

2.2.1 SOD 活性 由图 4 可见,两种冻藏温度下,紫衣、百慕田和 947-5s 叶片 SOD 活性变化趋势一致,随着冻藏时间的延长,SOD 活性呈现升高-降低-

再升高的趋势。-40 和 -80 °C 冻藏 12 d 时紫衣、百慕田和 947-5s 的 SOD 活性较 0 d 时分别升高了 57.01%,78.26% 和 46.81%;61.43%,77.37% 和 60.69%。冻藏 24 d 时 SOD 活性基本降低到初始水平,之后 SOD 活性一直保持上升趋势。

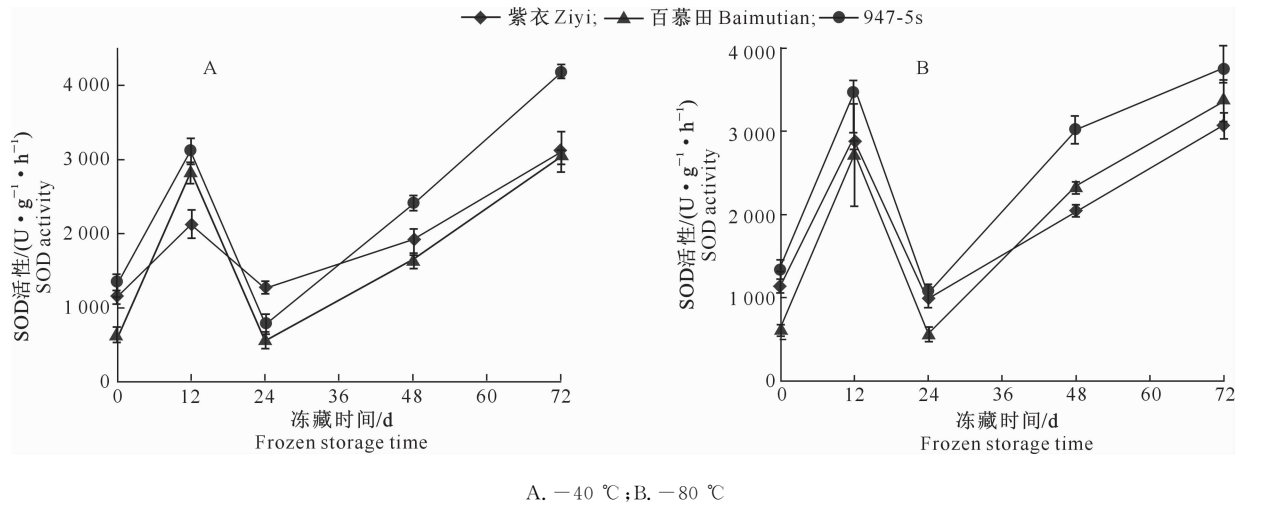


图 4 不同冻藏温度下白菜叶片 SOD 活性的变化

Fig. 4 Changes of SOD activities in Chinese cabbage leaves at different frozen storage temperature

2.2.2 POD 活性 由图 5 可见,在两种冻藏温度下,紫衣、百慕田和 947-5s 叶片 POD 活性变化趋势一致,随着冻藏时间的延长,POD 活性呈现下降-上升-下降的趋势,即冻藏 0~24 d POD 活性下降到低点,24~48 d POD 活性上升到高点,48~72 d POD

活性又降低。与 -80 °C 冻藏处理相比,-40 °C 冻藏处理 POD 活性降低和升高的速度较慢,幅度较小。两种冻藏温度冻藏不同时间对 3 个白菜 POD 活性影响也不同,其中对 947-5s 的 POD 活性影响较小,对紫衣和百慕田的 POD 活性影响较大。

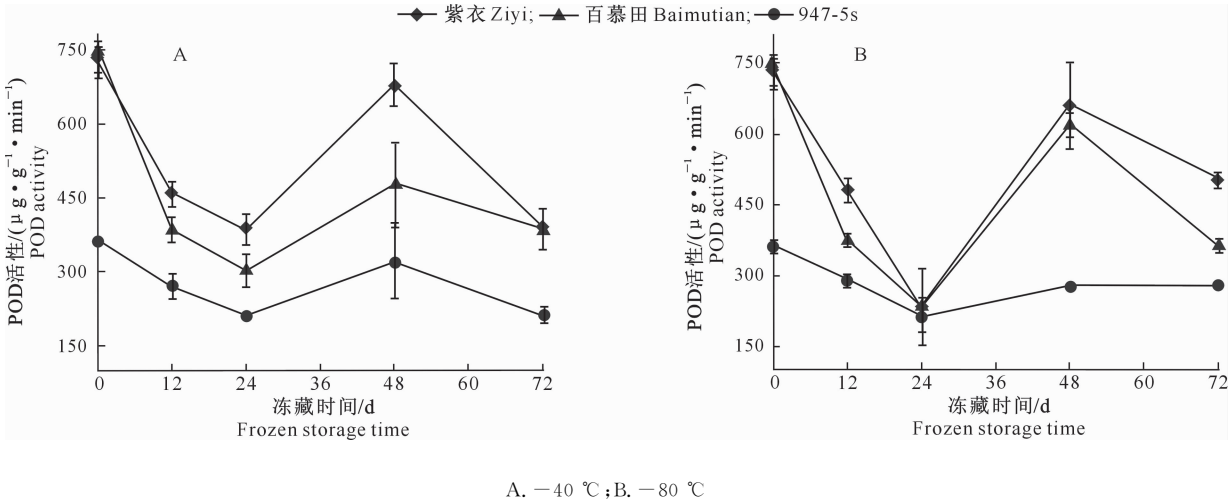


图 5 不同冻藏温度下白菜叶片 POD 活性的变化

Fig. 5 Changes of POD activities in Chinese cabbage leaves at different frozen storage temperature

2.2.3 MDA 含量 由图 6 可见,两种冻藏温度下,紫衣、百慕田和 947-5s 叶片 MDA 含量明显不同。两种温度下,紫衣白菜 MDA 含量变化趋势一致,随着冻藏时间延长,MDA 含量呈现下降-上升-下降-上升的波浪式趋势。 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏条件下,947-

5s 和百慕田的 MDA 含量变化趋势一致,呈现上升-下降-上升趋势,与紫衣白菜的变化明显不同。 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏条件下,947-5s 和百慕田的 MDA 含量呈现上升-下降-上升-下降趋势。

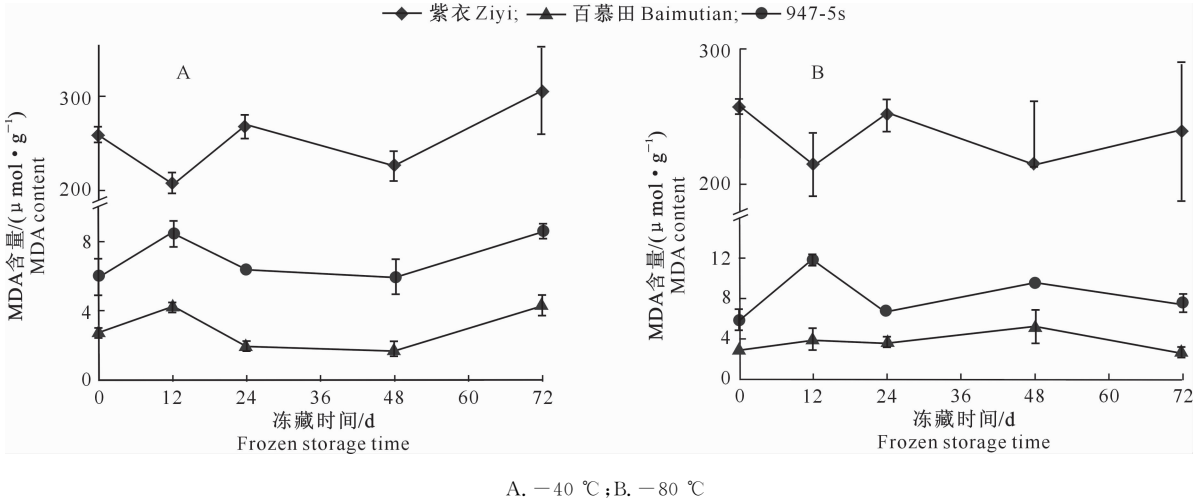


图 6 不同冻藏温度下白菜叶片 MDA 含量的变化

Fig. 6 Changes of MDA contents in Chinese cabbage leaves at different frozen storage temperature

3 讨论与结论

冷冻保藏能有效地抑制因微生物生长繁殖而引起的腐败变质,同时可降低细胞酶的活性,较大幅度地保持样品的质量,是食品与样品保存的重要方式。相比较冷藏而言,冻藏抑制微生物生长和降低酶活性的效果更好,然而冻藏往往会引起细胞结构破坏和细胞质状态的变化,引起更复杂的生理生化变化^[20-21]。再吐尼古丽·库尔班等^[22]指出,冷冻核桃枝条 MDA 含量的降低,可能是由 MDA 和细胞中

的蛋白质、酶等物质结合、交联以及 SOD、POD、CAT 等保护酶的共同作用所致。晏绍庆等^[23]对在玻璃化($-75\text{ }^{\circ}\text{C}$)和非玻璃化($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$)保藏 2 个月的草莓研究发现,冻结及贮藏过程均会引起草莓中可溶性多酚氧化酶(PPO)和 POD 活性先上升再下降的大幅度变化。包海蓉等^[24]指出,草莓冻藏过程中 POD 活性变化受到多种因素影响,例如最大冰晶生成带、冻结速率引起的热力以及细胞结构的破坏等。此外,取样时间、酶活性测定前解冻时间和温度等都会影响 SOD、POD 活性及 MDA 含量变化。晏

绍庆等^[25]研究发现,不同冻结速率对苹果片可溶性 POD 和可溶性 PPO 活性的影响不同,并认为冻结速率对 POD、PPO 活性影响主要包括低温断裂对细胞结构的破坏、冻结溶液浓缩和迁移效应(pH 和离子强度变化、胞内溶液的外渗等)以及低温本身对酶活性的影响。李敏等^[26]报道,4 个品种树莓果实在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏不同时间,可溶性 PPO、POD、纤维素酶及果胶酶活性的变化趋势不同,虽然各品种同一酶活性的变化趋势相似,但品种间的酶活性曲线存在多处交叉,即不同时间点各品种的酶活性变化不同。本试验研究发现,不同温度下贮藏 0 d 时白菜叶片 SOD、POD 活性及 MDA 含量各不相同,从大到小的顺序分别是 947-5s>紫衣>百慕田,百慕田>紫衣>947-5s,紫衣>947-5s>百慕田,3 个白菜品种叶片只有 SOD 的活性在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏 0~5 d 时处于稳定期; $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻藏的 SOD、POD 活性及 MDA 含量随着时间变化呈现不同的变化趋势,与李敏等^[26]报道相同,表明冻藏条件下这 3 个指标变化取决于其组成细胞的状态。因此,在大白菜 SOD、POD 活性及 MDA 含量研究中,由于 SOD 活性测定的样品可以冷藏 1~5 d,而用于 POD 活性和 MDA 含量测定的样品必须为鲜样。有关低温导致 3 种逆境指标变化机理,是白菜材料超低温保存的基础,对此还有待进一步研究。

[参考文献]

- [1] 张少丽. 温敏型大白菜雄性不育系育性转化机理的研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
Zhang S L. The mechanisms of fertility change over in the RMO-sensitive TsCMS7311 line Chinese cabbage [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.
- [2] 李真真,武佩琪,程亚雄,等. 大白菜雄性不育花蕾均一化 cDNA 文库的构建及评价 [J]. 植物生理学报,2018(2):291-296.
Li Z Z, Wu P Q, Cheng Y X, et al. Construction and evaluation of flower bud normalized cDNA library of male sterile of Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. *pekinensis*) [J]. Plant Physiology Journal, 2018(2):291-296.
- [3] 陈伟耀,李金兰,陈伟寿,等. 急性盐度胁迫对光裸星虫渗透压和超氧化物歧化酶活性的影响 [J]. 安徽农业科学,2018,46(11):66-68,83.
Chen W Y, Li J L, Chen W S, et al. Effects of acute salinity stress on osmotic pressure and superoxide dismutase activity of *Sipunculus nudus* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018,46(11):66-68,83.
- [4] 贾红玉,王亚森,田晓辉,等. 邻苯三酚自氧化法在 SOD 活性测定中的应用 [J]. 河北大学学报(自然科学版),2018,38(3):284-290.
Jia H Y, Wang Y S, Tian X H, et al. Pyrogallol autoxidation and its application to SOD activity assay [J]. Journal of Hebei University(Natural Science Edition), 2018,38(3):284-290.
- [5] 苏小俊,袁希汉,徐海. 大白菜耐热性和过氧化物酶活性与热害指数的相关性 [J]. 江苏农业学报,2007,23(5):456-458.
Su X J, Yuan X H, Xu H. Correlation between heat tolerance and POD activity and heat injury index of Chinese cabbage (*Brassica chinensis*) [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2007,23(5):456-458.
- [6] 韩涛,李丽萍. 果实和蔬菜中的过氧化物酶 [J]. 食品与发酵工业,2000,26(1):69-73.
Han T, Li L P. A review on peroxidases in fruits and vegetables [J]. Food and Fermentation Industries, 2000,26(1):69-73.
- [7] 肖黎斌,韩军岐,张润光,等. 鲜枣采后生理、贮藏病害及保鲜技术研究进展 [J]. 陕西农业科学,2016,62(4):87-91.
Xiao L B, Han J Q, Zhang R G, et al. Advances in research on postharvest physiology, storage period disease and preservation technology of fresh jujube [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2016,62(4):87-91.
- [8] 王瑞,马凤鸣,李彩凤,等. 低温胁迫对玉米幼苗脯氨酸、丙二醛含量及电导率的影响 [J]. 东北农业大学学报,2008,39(5):20-23.
Wang R, Ma F M, Li C F, et al. Effect of low temperature stress on proline, malondialdehyde contents and electric conductivity of maize seedling [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008,39(5):20-23.
- [9] 王仕林,黄辉跃,唐建,等. 低温胁迫对油菜幼苗丙二醛含量的影响 [J]. 湖北农业科学,2012,51(20):4467-4469.
Wang S L, Huang H Y, Tang J, et al. Effects of low temperature stress on the content of malondialdehyde in rape seedlings [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012,51(20):4467-4469.
- [10] 蔚丽珍,张鲁刚,贺少轩,等. 大白菜幼苗叶片抗氧化酶系统对黑腐病菌入侵的反应 [J]. 植物病理学报,2010,40(2):122-128.
Yu L Z, Zhang L G, He S X, et al. Response of anti-oxidant system to infection of *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* in seedling leaf of Chinese cabbage [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 2010,40(2):122-128.
- [11] 曾秀存. 白菜型冬油菜抗寒生理响应与抗氧化酶基因表达分析 [D]. 兰州:甘肃农业大学,2015.
Zeng X C. Anti-cold physiology response and antioxidant enzyme genes expression on winter turnip rape (*Brassica campestris* L.) [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015.
- [12] 余铭,陈海强,梁钻好,等. 速冻方式对番木瓜浆功能酶活力冻藏稳定性的影响 [J]. 食品科学,2013,34(20):338-341.
Yu M, Chen H Q, Liang Z H, et al. Effects of different Quick-Freezing methods on the stability of enzymes in frozen papaya pulp [J]. Food Science, 2013,34(20):338-341.
- [13] Qu M, Liu Y J, Qin L A. Extraction of SOD from alfalfa with ultrasonic assisted [J]. Advanced Materials Research, 2015,1089:163-166.

- [14] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360.
Song Y L, Yu J, Chen S G, et al. Effects of reduced chemical fertilizer with application of bio-organic fertilizer on rape growth microorganism and enzymes activities in soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 352-360.
- [15] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2003.
Zou Q. Plant physiology experiment guide [M]. Beijing, China Agriculture Press, 2003.
- [16] 曹建康,姜微波.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
Cao J K, Jiang W B. Post-harvest physiological and biochemical experiment guidance for fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [17] 严良文,陈瑶瑶,刘智成.乙烯利处理对苦瓜氧化酶活性及苦瓜性别分化的影响[J].南方农业学报,2017,48(10):1844-1848.
Yan L W, Chen Y Y, Liu Z C. Effects of ethephon on activities of oxidase enzymes and sex differentiation of bitter melon [J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(10): 1844-1848.
- [18] 程艳,陈璐,米艳华,等.水稻抗氧化酶活性测定方法的比较研究[J].江西农业学报,2018(2):108-111.
Cheng Y, Chen L, Mi Y H, et al. Comparative study on various methods for determination of activity of antioxidant enzymes in rice [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018(2): 108-111.
- [19] 詹少华,林毅,吕凯.天然彩色棉过氧化物酶、丙二醛及硝酸还原酶的测定[J].安徽农业科学,2005,33(1):23-24.
Zhan S H, Lin Y, Lü K. Examination of some chemical materials of natural color cotton [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2005, 33(1): 23-24.
- [20] 陈迪,张滨,王金水.速冻和缓冻处理对冷冻面团中乳酸菌活力的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2018,39(1):21-25.
Chen D, Zhang B, Wang J S. Effects of quick-freezing and slow-freezing on activity of lactic acid bacteria in frozen sourdough [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 21-25.
- [21] 王远,刘春菊,刘春泉,等.冻结方式对莲藕片品质及微观结构的影响[J].江苏农业学报,2015,31(4):924-928.
Wang Y, Liu C J, Liu C Q, et al. Effect of different freezing methods on the quality and microstructure of lotus root slices [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2015, 31(4): 924-928.
- [22] 再吐尼古丽·库尔班,吐尔逊·吐尔洪,叶凯,等.不同冷冻温度、时间对核桃枝条抗寒性生理生化指标的影响[J].中国农学通报,2016,32(28):22-27.
Zaituniguli · Kuerban, Tuerxun · Tuerhong, Ye K, et al. Effect of freezing temperature and time on cold resistance indices of walnut shoots [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(28): 22-27.
- [23] 晏绍庆,周培根.玻璃化保存草莓多酚氧化酶和过氧化物酶活性变化的实验研究[J].食品科学,2000,21(1):58-62.
Yan S Q, Zhou P G. Study on contents related to technological and building design of fast food industry [J]. Food Science, 2000, 21(1): 58-62.
- [24] 包海蓉,王华博.草莓冻藏过程中多酚氧化酶、过氧化物酶及维生素C的变化研究[J].食品科学,2005,26(8):434-436.
Bao H R, Wang H B. Changes of polyphenol oxidase, peroxidase activities and vitamin C of strawberry during frozen storage [J]. Food Science, 2005, 26(8): 434-436.
- [25] 晏绍庆,刘宝林,华泽钊,等.冻结速率对苹果片多酚氧化酶和过氧化物酶活性影响的研究[J].食品工业科技,2000(2):8-10.
Yan S Q, Liu B L, Hua Z Z, et al. Study on the effect of freeze rate on apple slice's polyphenol oxidase and peroxidase activities [J]. Science and Technology of Food Industry, 2000(2): 8-10.
- [26] 李敏,尚宏丽.树莓冻藏过程中PPO、POD、纤维素酶及果胶酶活性变化的研究[J].饲料研究,2016(12):41-45.
Li M, Shang H L. Changes of PPO, POD, cellulase and pectinase activities during frozen storage of raspberry [J]. Feed Research, 2016(12): 41-45.