

采后水分和营养胁迫对西兰花未成熟衰老中 相关酶活性的影响

杨绍兰, 刘燕, 王成荣, 王然
(青岛农业大学园艺学院, 山东青岛 266109)

摘要: 本研究以西兰花 (*Brassica oleracea*) 花蕾为试材, 研究了采后水分胁迫和营养胁迫对西兰花贮藏过程中色值变化、叶绿素含量、抗坏血酸 (Vitamin C, Vc) 含量、呼吸强度、超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量以及总抗氧化能力的影响。结果表明, 西兰花在采后贮藏过程中花蕾出现黄化现象, 采后水分和营养胁迫加速了西兰花叶绿素、Vc 的降解。采后 12 h, 对照、水处理、聚乙二醇 (polyethylene glycol, PEG) 处理、PEG 加营养液处理和营养液处理的花球 Vc 含量为 8.84 mg/100g, 12.16 mg/100g, PEG 24.44 mg/100g, PEG 30.68 mg/100g, 27.56 mg/100g。采后水分和营养胁迫均可导致西兰花花蕾 POD 活性下降, CAT 活性峰值升高, 两者同时发生时, 延缓了西兰花花蕾总抗氧化性的上升。SOD、POD、CAT 活性和总抗氧化性相比较可以看出, 总抗氧化能力比单纯的某一种抗氧化酶更能反映西兰花的抗衰老能力。

关键词: 西兰花; 营养胁迫; 水分胁迫; 抗氧化性

文章编号: 1673-9078(2014)11-53-59

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.11.011

Effect of Water Stress and Nutrition Stress on Premature Senescence-related Enzyme Activity in Harvested Broccoli

YANG Shao-lan, LIU Yan, WANG Cheng-rong, WANG Ran

(College of Horticulture, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: The effects of post-harvest water stress and nutrition stress during storage on broccoli (*Brassica oleracea*) florets were studied based on changes in color, chlorophyll content, ascorbic acid (vitamin C, Vc) content, respiratory rate, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, catalase (CAT) activity, malondialdehyde (MDA) content, and the total antioxidant capacity. The broccoli florets showed yellowing during storage. Water stress and nutrition stress accelerated the degradation of chlorophyll and Vc. The Vc contents of the control sample and samples subjected to water treatment, polyethylene glycol (PEG) treatment, PEG + nutrition treatment, and nutrition treatment of 12 h post-harvest were 8.84 mg/100 g, 12.16 mg/100 g, 24.44 mg/100 g, 30.68 mg/100 g, and 27.56 mg/100 g, respectively. Post-harvest water stress and nutrition stress can both result in reduced POD activity and increased CAD activity. When these two stresses occur simultaneously, the increase in the total antioxidant capacity is delayed in broccoli florets. Therefore, the total antioxidant capacity could reveal the anti-senescence capacity better than a single antioxidant in broccoli, based on comparisons of SOD, POD, and CAT activities with the total antioxidant capacity.

Key words: broccoli; nutrition stress; water stress; antioxidant capacity

西兰花 (*Brassica oleracea*), 是十字花科芸苔属

收稿日期: 2014-05-13

基金项目: 山东省现代产业技术体系蔬菜贮藏加工创新团队 (SDSXDSGCYJSTX); 山东自然科学基金项目 (Y-2002-D-04); 青岛市自然科学基金资助项目 (06-2-2-15-jch); “十二五” 国家科技支撑计划项目 (2014BAD05B00)

作者简介: 杨绍兰 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为果蔬采后生理与分子生物学

通讯作者: 王然 (1960-), 女, 博士, 教授, 研究方向为园艺植物育种

甘蓝种中以绿色花球为产品的一、二年生植物。因富含维生素 C 和抗癌类芥子油苷而备受消费者青睐^[1-2]。

西兰花采收时期处于小花蕾旺盛生长发育阶段, 采后由于切断了原有的水分和营养的供应与平衡, 使花蕾组织受到一系列胁迫, 包括采收时的机械伤害以及随后的营养胁迫和水分胁迫等, 从而使采后花蕾快速黄化、腐烂, 常温下货架期仅 2~3 d, 严重影响了西兰花的贮藏寿命^[3]。

抗坏血酸 (Vitamin C, Vc) 含量在西兰花贮藏阶

段逐渐下降,一些延缓西兰花采后衰老的贮藏措施如低温和微真空贮藏均能延缓 Vc 含量的下降^[4~5]。花蕾 Vc 的含量高于花茎,其采后下降速率在花蕾形态衰老转折期前较缓慢,次后随衰老进程的加速, Vc 下降明显加快。花茎衰老缓慢,其 Vc 下降速率也明显慢于花蕾,花蕾完全衰老时,花茎 Vc 含量高于花蕾^[6]。Ma 等^[7]认为采后 1-甲基环丙烯(1-Methylcyclopropene, 1-MCP)处理延缓了西兰花的黄化速度,并且在两个品种‘Haitsu’和‘Ryokurei’中,1-MCP 通过下调抗坏血酸过氧化物酶基因 BO-APX1 基因和 BO-APX2,上调脱氢抗坏血酸还原酶基因 BO-DHAR 和谷氨酸脱氢酶基因 BO-GLDH 从而延缓了 Vc 含量的下降。

大量研究表明,植物在遭受逆境胁迫或在衰老过程中,产生超氧化物阴离子自由基 O_2^- 及过氧化氢 H_2O_2 、羟自由基 $\cdot OH$ 等活性氧累积,使细胞膜系统造成伤害;同时植物体内存在酶促和非酶促两类活性氧清除系统,前者包括超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)和过氧化氢酶(CAT, Catalase)等,后者包括 Vc、 α -生育酚(VE)、还原型谷胱甘肽(Glutathione, GSH)等。水分胁迫下,细胞内活性氧的产生与清除平衡会遭到破坏而出现活性氧的累积^[8]。积累起来的活性氧会引发或加剧细胞膜脂过氧化,造成膜系统损伤,严重时导致细胞死亡^[9~10]。目前,在草莓^[11]、柿^[12]、荔枝^[13]、枇杷^[14]等果树上,关于水分胁迫对活性氧代谢的研究均有报道。Hasperue^[15]等认为采收时间在延缓西兰花衰老的同时,其叶绿素含量,抗氧化性和多酚含量都保持在较高水平。

采收引起的多因素胁迫是导致西兰花未成熟衰老的外在原因。因此,本研究以西兰花为试材,研究收获造成的水分和营养胁迫与未成熟衰老之间的关系,进一步揭示西兰花未成熟衰老的机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以西兰花品种“优秀”(Brassica oleracea var.italica.youxu)为试材。清晨将西兰花整株收获并运回实验室。选择整齐一致未受伤的花头,留取花茎 12 cm,切除根部和叶子,用于试验处理。

1.2 试验处理

处理 1:按照常规,将花头直接放在试验条件下分析其贮藏过程中相应参数变化,用作对照;

处理 2:将花头茎基部放在蒸馏水中;

处理 3:将花头茎基部放在含有 7.5% PEG6000 水溶液中;

处理 4:将花头茎基部放在含有 1/2 MS 无机盐的混合溶液中;

处理 5:将花头茎基部放在含有 7.5% PEG6000 和 1/2MS 无机盐的混合溶液中;

小液流法测西兰花茎组织水势为 -1 bar,即 -0.1 MPa^[128]。

PEG 溶液的水势计算公式为: $\Psi_{PEG}=1.29[PEG]2T-140[PEG]2-4[PEG]$ 。式中, Ψ_{PEG} 为 PEG 溶液的水势,单位为 bar; [PEG] 为 PEG 浓度,单位为 g/g(水); T 为温度(摄氏度)。计算的 PEG 浓度约为 0.075 g/g(水),所以 PEG 浓度定为 7.5%。因为 Ms 营养液几乎不影响纯水的水势,所以随机设计了几个营养液浓度,水, 1/10 Ms、1/8 Ms、1/5 Ms、1/3 Ms、1/2 Ms、Ms 通过最简单的外观指标,黄化程度,萎蔫程度,切口腐烂度确定了最佳营养液浓度为 1/2 Ms。所有处理及随后的试验均在 $25\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 85~90%条件下进行。

处理开始时为 0 h,每隔 12 h 取样一次,同时观察各处理花蕾黄化程度,并以分值表示。取材时每个处理每次随机选取西兰花 5 个。取材部位分为四部分:小花蕾,茎切面切去 2 mm 后紧靠着的为第一层、主茎中部、花头基部。所取样品经液氮速冻后,于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中保存备用。

1.3 试验方法

1.3.1 外观颜色评分

取材的同时,对花球外观颜色进行评分,评分标准如下:100%绿-5分;80%绿-4分;60%绿-3分;40%绿-2分;20%绿-1分;100%黄化-0分。

1.3.2 呼吸强度测定

呼吸强度测定主要参考李合生的小篮子法(广口瓶法)^[16]测试整个花头的呼吸速率。单位为 $\text{mg CO}_2/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。在一个容量约为 10 kg 的干燥器内放一培养皿,培养皿内放 25 mL 0.4 mol/L 的 NaOH 溶液,用来吸收呼吸释放的 CO_2 ,再在干燥器中放置 1~2 kg 样品,盖上瓶子用凡士林密封,放置 1~2 h,再将平皿取出用煮沸的蒸馏水转移至三角瓶中,加入饱和 BaCl_2 溶液 20 mL 和两滴酚酞指示剂,使溶液呈红色,然后用 0.1 M 的草酸滴定至无色,记下所用去的草酸毫升数。按照同样步骤作一个空白对照试验。由空白和样品所消耗的草酸体积之差可以计算出呼吸强度。

呼吸速率 $[\text{mg CO}_2/(\text{kg}\cdot\text{h})] = (A-B) \times 1 / (W \times t)$

其中 A:空白滴定用去的草酸量 (mL); B:样品滴定用

去的草酸量 (mL); W: 样品鲜重 (kg); t: 测定时间 (h)。

每毫升 1/44 mol/L 的草酸相当于 1 mgCO₂。

1.3.3 叶绿素测定

按舒展的方法测定^[17]。

1.3.4 Vc 含量测定

采用 2,6-二氯酚钠盐法测定^[16]。

Vc 总含量(mg/(100g×Fw))=(C×Vt)/(Vs×Fw)

注: C: 标准曲线上查得的样品中 Vc 含量 (mg); Vt: 样液提取总体积 (mL); Vs: 测定用样液总体积 (mL); Fw: 样品质量 (g)。

1.3.5 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量的测定

酶液提取: 取低温下保存的样品 1 g 于预冷的研钵中, 加入适量的石英砂、7 mL 提取缓冲液 (50 mmol/L 磷酸缓冲液 pH 7.5), 研磨。匀浆后于 4℃, 10000 r/min 离心 15 min, 取上清液用于分析测定 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量。

SOD 活性测定采用氮蓝四唑 (NBT) 法^[16]。

以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活性单位 (U), 用 U/g FW 表示。

POD 活性测定参照 Cai 等^[18]。以每分钟内 A470 变化 0.01 为 1 个过氧化物酶活性单位 (U), 酶活力用 U/g FW 表示。

CAT 活性测定采用高锰酸钾滴定法^[16]。用每克鲜重样品 1 min 内分解 H₂O₂ 的毫克数表示一个酶活单位 (U), CAT 活性用 U/g FW 表示。

MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸比色法^[16]。单位是 μmol/g FW。

1.3.6 总抗氧化性的测定

取 0.5 g 花蕾加 95% 乙醇研磨最后定容至 6 mL, 密封、室温浸提 5 h 后, 800 g 离心, 取上清液待用。按照许申鸿的比色方法^[19]在 1 cm 比色皿中加样, 反应 30 min 后测定 517 nm 吸光值, 反应体积 3 mL, 每样重复 3 次, 取平均值计算自由基的清除率。

$$\text{清除率}(\%) = 1 - \frac{A_t - A_1}{A_0}$$

注: A₀: 2.5 mL 6.5×10⁻⁵ DPPH 液+0.5 L 试样溶剂; A₁: 2.5 mL 6.5×10⁻⁵ DPPH 液+0.5 L 样品; A_t: 2.5 mL DPPH 液溶剂+0.5 L 样品。

$$\text{抗氧化活性} = \text{清除率} \times \frac{\text{DPPH浓度} \times \text{DPPH体积}}{\text{样品浓度} \times \text{样品体积}}$$

注: 抗氧化活性为清除 DPPH 量 g/g。

1.3.7 结果统计方法

采用 Excel 和 origin 软件进行数据分析和作图, 统计分析采用 DPS 7.05 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 采后水分和营养胁迫对西兰花黄化和叶

绿素降解的影响

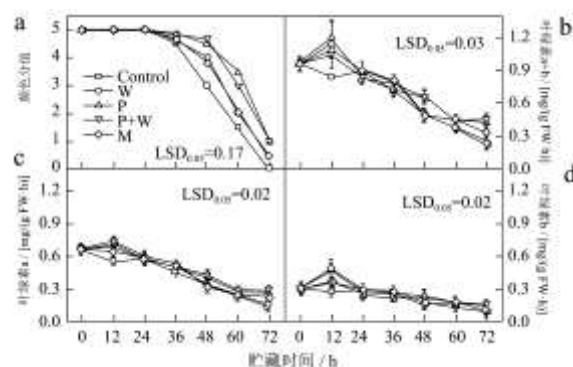


图 1 贮藏过程中西兰花颜色和叶绿素含量的变化

Fig.1 Changes in color and chlorophyll content in broccoli during storage

注: a: 颜色打分; b: 叶绿素a+b; c: 叶绿素a; d: 叶绿素b; Control: 对照; W: 水处理; P: PEG处理; P+M: PEG加营养液处理; M: 营养液处理。

对西兰花采后不同处理花球色值测定的结果表明, 不同处理西兰花, 自收获后的 24 h 开始黄化, 至 72 h 全部黄化, 对照降为 0, 水处理的色值为 0.5, PEG 处理的为 1, PEG 加营养液处理的为 1, 营养液处理的为 0.5 (图 1a)。其中以收获后不加任何处理的花球黄化速度最快, 纯水处理和营养处理次之, PEG 处理和 PEG 加营养液的处理花蕾黄化速度最慢。不管基部供水的水势大小, 加入营养液与否对花蕾黄化速度影响不明显。这说明, 采后营养缺乏可能不是引起花蕾黄化的主要因素。水分与营养相比, 采后水分胁迫可能对西兰花花蕾黄化起更重要的作用。

叶绿素含量测定的结果表明 (图 1b、c、d 所示), 对照叶绿素含量 0 h 之后就下降, 而其它处理的西兰花, 其叶绿素含量于采后 12 h 内有所增加, 24 h 之后所有处理均开始下降。原因可能是采后适当供应水分, 叶绿素还有一段时间可以继续合成。PEG 处理和 PEG 加营养处理的花蕾黄化速度慢可能与西兰花贮藏前期叶绿素的合成有关。由图 1 可知, 西兰花采后叶绿素含量的下降主要是叶绿素 a 的降解, 叶绿素含量在采后初期的上升主要是因为叶绿素 b 的合成。

2.2 采后水分和营养胁迫对西兰 Vc 降解的影

响

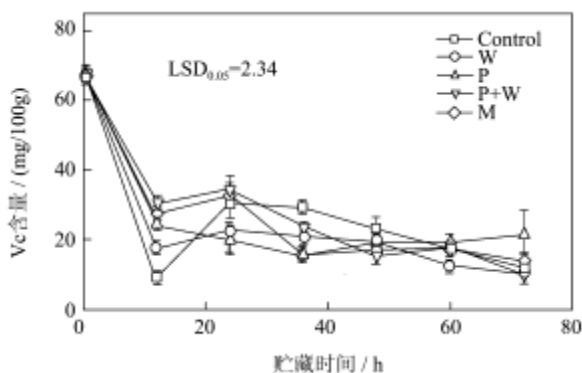


图2 贮藏过程中西兰花花蕾 Vc 含量的变化

Fig.2 Changes in the ascorbic acid content of broccoli florets during storage

注: Control: 对照; W: 水处理; P: PEG处理; P+M: PEG加营养液处理; M: 营养液处理。

西兰花贮藏过程中的 Vc 含量结果表明(见图2), 贮藏0 h后 Vc 含量下降, 采后12 h内下降尤为迅速, 对照花球采后12 h的 Vc 含量为8.84 mg/100 g, 水处理为12.16 mg/100 g, PEG处理为24.44 mg/100 g, PEG加营养液处理的为30.68 mg/100 g, 营养液处理的为27.56 mg/100 g。其中, 对照花球 Vc 含量下降最快, 水处理次之, 营养液处理和 PEG 加营养液的处理花蕾 Vc 含量下降最慢。水处理和营养液处理相比, 水处理 Vc 下降较快; PEG 处理和 PEG 加营养液的处理相比, 前者下降较快。这说明, 采后水分胁迫和营养胁迫加速了花蕾 Vc 的降解, 水分和营养胁迫相比, 营养胁迫可能对西兰花花蕾 Vc 降解起更重要的作用。对照处理, 采后12 h Vc 含量上升, 可能是西兰花此时失水比较严重, Vc 的相对含量升高。

2.3 采后水分和营养胁迫对西兰花呼吸强度的影响

由图3可见, 不同处理西兰花呼吸强度采后24 h内均快速下降, 随后呼吸强度均有不同程度上升然后下降。各处理呼吸高峰的峰值明显不同, 营养液处理和 PEG 加营养液的处理峰值最高, PEG 处理次之, 水处理呼吸峰最低, 对照和营养液处理的峰值稍高于水处理而低于用 PEG 的处理。水处理和营养液处理相比, 水处理呼吸高峰低于营养液处理, PEG 处理和 PEG 加营养液的处理相比, 前者呼吸高峰低。水处理、PEG 处理和对照相比, PEG 的处理呼吸峰明显高于对照高于水处理。这表明采后水分和营养胁迫降低了西兰花的呼吸峰, 水分过多和水分缺乏胁迫相比, 水分过多胁迫对西兰花的呼吸峰影响更大一些。另外各个处理西兰花呼吸速率的开始上升与花蕾开始黄化的时

间一致, 从而表明呼吸速率上升启动了西兰花的衰老。

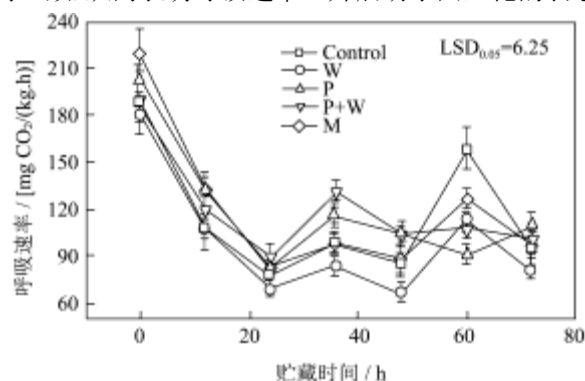


图3 贮藏过程中西兰花呼吸速率的变化

Fig.3 Changes in the respiration rate of broccoli during storage

注: Control: 对照; W: 水处理; P: PEG处理; P+M: PEG加营养液处理; M: 营养液处理。

2.4 采后水分和营养胁迫对西兰花 MDA 含量的影响

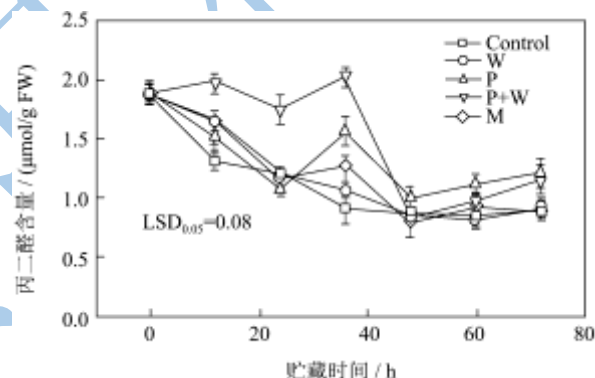


图4 贮藏过程中西兰花丙二醛含量的变化

Fig.4 Changes in the MDA content of broccoli florets during storage

注: Control: 对照; W: 水处理; P: PEG处理; P+M: PEG加营养液处理; M: 营养液处理。

采后不同处理西兰花花蕾 MDA 含量变化的结果表明(图4), 水处理和对照的西兰花花蕾 MDA 含量在贮藏过程中呈下降趋势; 营养液处理和 PEG 处理花蕾中 MDA 含量随贮藏时间延长下降, 但是在贮藏中期36 h均有不同程度的增加然后又下降, PEG 加营养液的处理, 前24 h MDA 含量变化不大, 之后 MDA 含量上升, 48 h 又急剧下降。贮藏前期12 h, 水处理和对照相比, 对照 MDA 下降速度较快, 贮藏48 h之后二者 MDA 含量下降趋于一致; 营养液处理、PEG 处理和 PEG 加营养液的处理比较, PEG 加营养液的处理 MDA 含量下降较慢, 营养液处理次之, PEG 处理的 MDA 含量下降最快; 之后各处理 MDA 含量开始上升, 于36 h 达到最大值, 随后开始降低, 48 h 后变

化趋于平缓; PEG 加营养处理的 MDA 峰值最高, PEG 处理次之, 营养液处理最低。贮藏 48 h 后, PEG 处理 MDA 含量最高, PEG 加营养的处理次之, 其它三个处理 MDA 含量最低趋于一致。由此可见, 采后水分和营养胁迫影响了西兰花 MDA 含量, 水分过多胁迫和水分缺乏胁迫使西兰花 MDA 含量下降, 也就是加速了 MDA 自动氧化速率, 营养胁迫也加速了 MDA 自动氧化速率。但是 MDA 和呼吸速率一样, 其含量和峰值与花蕾的黄化好像没有直接的关系, 可能西兰花“优秀”的 MDA 自动氧化速率不是影响西兰花衰老的关键因素。

2.5 采后水分和营养胁迫对西兰花抗氧化酶活性的影响

采后西兰花 SOD 活性呈现先下降后上升的趋势, 处理 0 h 的西兰花其 SOD 酶活性为 113.03 U/g FW, 贮藏 72 h 的酶活性分别为: 对照: 103.31 U/g FW, 水处理: 104.51 U/g FW, PEG 处理: 118.74 U/g FW, PEG 加营养液处理: 113.51 U/g FW, 营养液处理: 106.52 U/g FW (图 5a)。在衰老过程中各个处理 SOD 活性波动较大。

对 POD 活性测定结果表明, 不同处理西兰花在室温自然条件下贮藏 12 h, 其活性急剧下降 (图 5b)。采后 12 h 各处理的 POD 酶活性分别为: 对照: 2459.31 U/g FW, 水处理: 2216.64 U/g FW, PEG 处理: 2179.33 U/g FW, PEG 加营养液处理: 1642.67 U/g FW, 营养液处理: 1936.67 U/g FW。其中 PEG 加营养的处理其花蕾中 POD 活性下降最快, 营养液处理次之, 对照下降最慢。PEG 处理和水处理活性下降速度快于对照而慢于营养液处理。贮藏至 60 h 后, PEG 处理和水处理的 POD 活性上升, 而且 PEG 处理的 POD 活性高于水处理。由此可见, 采后水分和营养胁迫均可导致西兰花花蕾 POD 活性下降, 水分和营养胁迫同时发生时影响最大, 水分过多胁迫影响最小。

CAT 活性变化结果表明, 西兰花采后 CAT 活性呈先升高后下降的趋势 (图 5c)。水处理、营养液处理、PEG 处理和 PEG 加营养液的处理, CAT 活性均在采后 48 h 最高, 峰值分别为: 14.67 U/g FW, 14.07 U/g FW, 14.43 U/g FW 和 14.16 U/g FW。对照 CAT 活性在采后 60 h 最高, 峰值为 14.52 U/g FW。其中水处理和对照峰值最高, PEG 加营养液的处理次之, 而营养液处理和 PEG 处理 CAT 活性最低。由此可见, 营养胁迫分别与水分过多胁迫和水分缺乏胁迫同时发生时, 西兰花 CAT 活性峰值会升高, 单独的营养胁迫

和水分过多胁迫会使峰值降低, 营养胁迫和水分缺乏胁迫同时发生时还会推迟 CAT 活性高峰到来的时间。

总抗氧化活性测定结果表明, 在贮藏初期, 各个处理西兰花总抗氧化活性被诱导或刺激上升, 达到最高峰之后出现较长时间的波动。其中在总抗氧化性被诱导或刺激上升阶段, 营养液处理、PEG 处理和 PEG 加营养的处理总抗氧化性上升最快, 12 h 达到高峰, 采后 12 h 的抗氧化性分别为: 对照: 88.88%, 水处理: 85.2%, PEG 处理: 90.97%, PEG 加营养液处理: 91.3%, 营养液处理: 91.1%。对照 24 h 达到高峰, 为 92.93%。水处理总抗氧化性上升最慢, 36 h 达到高峰, 为 92.52% (图 5d)。这说明, 采后水分缺乏和营养胁迫同时发生时, 延缓了西兰花花蕾总抗氧化性的上升, 水分过多胁迫也延缓了总抗氧化性的上升, 营养胁迫和水分胁迫相比, 水分胁迫对西兰花总抗氧化性影响要大。

SOD、POD、CAT 活性和总抗氧化性相比较可以看出, 西兰花中将活性氧转变成活性较低的物质或者无害的代谢产物的物质可能主要是象 Vc 类抗氧化剂而不是抗氧化酶类。

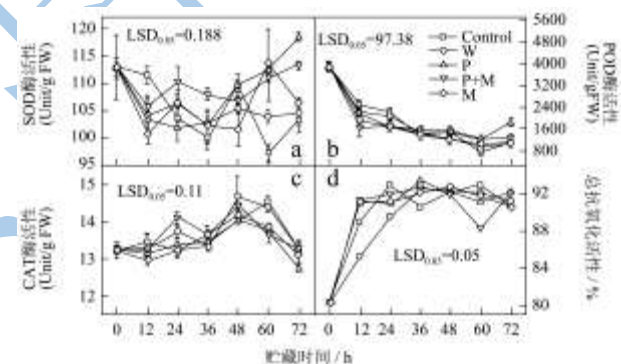


图 5 贮藏过程中西兰花抗氧化酶活性和总抗氧化活性的变化
Fig.5 Changes in SOD, POD, and CAT activities and the total antioxidant capacity in broccoli florets during storage

注: Control: 对照; W: 水处理; P: PEG 处理; P+M: PEG 加营养液处理; M: 营养液处理。

3 结论

3.1 西兰花采收后快速衰老, 衰老速度与品种, 采收时花蕾成熟度, 贮藏温度和贮藏环境气体成份有关。在 0~1 °C 西兰花能贮藏 31 d, 在 20 °C 仅 2~3 d。西兰花衰老最明显的特征是由于 Vc、蛋白、叶绿素和许多其他与外观和营养品质有关的化合物的降解而引起的黄化。

3.2 本试验结果显示, 贮藏过程中用 PEG 调节渗透势并适当补充无机盐的处理和单纯的无机盐处理, 其花蕾中 Vc 降解速度明显慢于对照和水处理, 单纯用

PEG 调节水势的处理居中。西兰花采收后的水分和营养胁迫影响了采后初期 Vc 的降解。由此可以说明水分胁迫和营养胁迫都能加剧 Vc 降解,但主要是营养胁迫影响 Vc 的降解。

3.3 采后适当供应具有一定渗透势的水或再适当补充无机盐均能明显降低花蕾黄化的速度。花蕾的黄化与叶绿素的降解速度也是一致的。这说明,采后的水分胁迫对西兰花的黄化和叶绿素的降解起主要的促进作用,失水胁迫比水分过多胁迫更能加速叶绿素的降解。这种促进作用有可能在一定程度上通过调控乙烯合成和作用而实现的。

3.4 西兰花属于呼吸跃变型植物。有报道认为呼吸作用和乙烯释放量升高时,花蕾开始黄化。我们的研究表明,所有处理西兰花呼吸高峰均出现在花蕾开始黄化之后,而且高峰的出现并没有使花蕾黄化加速,西兰花花蕾表现黄化可能不需要呼吸高峰的到来。此结论与 Guy 报道^[20]的花蕾呼吸跃变在形态衰老转捩期(初现黄色)的前一天出现,高的呼吸速率及呼吸跃变促进了花蕾的迅速衰老不同。但是采后的水分和营养胁迫明显降低了西兰花的呼吸强度。

3.5 组织衰老过程直接与活性氧的生成有关。活性氧的作用一方面在于激活细胞膜上磷脂酶活性,催化磷脂的脱酯作用,甾醇和游离脂肪酸的增加,另一方面,活性氧可导致膜质过氧化,产生乙烯、乙烷和 MDA。MDA 与蛋白质、核酸、磷脂交联形成类脂褐素之类的聚合物,从而破坏膜结构,增加膜透性。在正常组织中,活性氧的生成和清除是一个相对平衡的体系,对膜不造成太大伤害,而胁迫和衰老常引起这种平行关系的破坏,使自由基累积引发膜脂过氧化^[21]。本试验结果表明 CAT 在贮藏过程中活性加强,水分胁迫加速了膜脂过氧化。但是抗氧化酶 SOD 活性在贮藏过程中没有上升,POD 活性在贮藏过程中呈下降趋势。只有 CAT 在贮藏过程中活性加强,但是其活性仅是 POD 活性的几百分之一,对 H₂O₂ 的清除能力是微不足道的。

3.6 水分和营养胁迫加速了 Vc 和叶绿素降解,促进了贮藏期西兰花的衰老。总抗氧化活性比用单纯某种抗氧化酶活性的变化更能反映组织防御膜脂过氧化损伤的能力。

参考文献

[1] Fahey JW, Haristoy X, Dolan PM, et al. Sulforaphane inhibits extracellular, intracellular, and antibiotic-resistant strains of *Helicobacter pylori* and prevents benzo[a]pyrene-induced stomach tumors [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2002, 99:

7610-7615

- [2] Yuan GF, Sun B, Yuan J, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on shelf life, visual quality, antioxidant enzymes and health-promoting compounds in broccoli florets [J]. *Food Chemistry*, 2010, 118: 774-781
- [3] Leja M, Mareczek A, Starzynska A. Some antioxidant and senescence parameters of broccoli as related to its developmental stages [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2002, 24(3): 237-241
- [4] 牟其云,李文香,寇兴凯,等. 微真空贮藏条件对鲜切西兰花保鲜效果的影响[J].现代食品科技,2013,29(10):2469-2473
MU Qi-yun, LI Wen-xiang, KOU Xing-kai, et al. Effect of micro-vacuum storage conditions on the preservation of fresh-cut broccolis [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(10): 2469-2473
- [5] Downs CG, Somerfield SD, Davey MC. Cytokinin treatment delays senescence but not sucrose loss in harvested broccoli [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1997, 11:93-100
- [6] 叶陈亮,陈伟.西兰花花球衰老进程中呼吸及某些物质代谢的变化[J].园艺学报,1995,22(4):367-371
YE Chen-liang, CHEN Wei. Changes of respiration and some subsatnital metabolism in the senescence process of broccoli [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1995, 22(4): 367-371
- [7] Ma G, Zhang LC, Kato M, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on the expression of genes for ascorbate metabolism in postharvest broccoli [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 58: 121-128
- [8] Scandalions JC. Oxygen stress and superoxide dismutase and stress tolerance [J]. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1992, 43: 83-116
- [9] Price AH, Atherton NM, Herdry GAF. Plants under drought-stress generate activated oxygen [J]. *Free Radical Res., Commun.*, 1989, 8: 61-66
- [10] Adam A, Farakas T, Somlyai G, et al. Consequence of O²⁻ generation during a bacterially induced hypersensitive reaction in tobacco: deterioration of membrane lipids [J]. *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, 1989, 34: 13-26
- [11] 姚允聪,王有年,张瑞等.水分亏缺条件下草莓幼苗几个水分生理指标的变化[J].果树科学,1992,9(4):208-212
YAO Yun-cong, WANG You-nian, ZHANG Rui, et al. Changes of several water physiological indices in strawberry seedlings under water stress [J]. *Journal of Fruit Science*, 1992, 9(4): 208-212
- [12] 姚允聪,曲泽洲,李树仁,等.不同浇水处理过程中柿幼树 SOD、POD 和脂质过氧化作用的变化[J].北京农学院学

- 报,1994,9(1):22-27
- YAO Yun-cong, QU Ze-zhou, LI Shu-ren, et al. Changes in superoxide dismutase, catalase activities and lipid peroxidation in young persimmon trees treated with different irrigation [J]. Journal of Beijing Agricultural College, 1994, 9(1): 22-27
- [13] 陈立松,刘星辉.水分胁迫对荔枝叶片活性氧代谢的影响[J].园艺学报.1998,25(3):241-246
- CHEN Li-song, LIU Xing-hui. Effects of water stress on active oxygen metabolism in litchi leaves [J]. Acta Horticulturae Sinica, 1998, 25(3): 241-246
- [14] 潘东明,郑国华,谢厚钊,等.水分胁迫对枇杷叶片SOD活性及脂质过氧化作用[J].福建农学院学报(自然科学版), 1993, 22(2):254-257
- PAN Dong-ming, ZHENG Guo-hua, XIE Hou-chai, et al. Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in leaves of loquat under water stress [J]. Journal of Fujian Agricultural College, 1993, 22(2): 254-257
- [15] Hasperue, JH, Chaves, AR, Martinez, GA. End of day harvest delays postharvest senescence of broccoli florets [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59: 64-70
- [16] 李合生.植物生理生化实验原理与技术[M].北京:高等教育出版社,2001
- LI He-sheng. Principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001
- [17] 舒展,张晓素,陈娟,等.叶绿素含量测定的简化[J].植物生理学通讯,2010,46(4):399-402
- SHU Zhan, ZHANG Xiao-su, CHEN Juan, et al. The simplification of chlorophyll content measurement [J]. Plant Physiology Communications, 2010, 46(4): 399-402
- [18] Cai C, Xu CJ, Li X, et al. Accumulation of lignin in relation to change in activities of lignifications enzymes in loquat fruit flesh after harvest [J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 40: 163-169
- [19] 许申鸿,杭瑚.二苯代苦味腈基自由基分光测定方法及其应用的初步研究[J].植物生理学通讯,1999,35(6):474-477
- XU Shen-hong, HANG Hu. Preliminary study on dpph assay by spectrophotometry and it's application [J]. Plant Physiology Communications, 1999, 35(6): 474-477
- [20] Lynch DV, Sridhara S, Thompon JE. Lipoxygenase-gene at hydroperoxides amount for the nonphysiological feature of ethylene formation from 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate acid by microsomal membrane of carnations [J]. Planta, 1985, 164: 121-125
- [21] 郑永华,苏新国,李三玉,等.SO₂对冷藏枇杷果实品质及活性氧和多胺代谢的影响[J].植物生理学报,2000,26(5):397-401
- ZHENG Yong-hua, SU Xin-guo, LI San-yu, et al. Quality, active oxygen and polyamines metabolic changes in cold stored loquat fruits as affected by postharvest SO₂ treatment [J]. Acta Photophysiological Sinica, 2000, 26(5): 397-401