

二氧化氯熏蒸处理对西兰花品质的影响

Effect of chlorine dioxide fumigation treatment on quality of broccoli

李宇晴^{1,2} 卢立新^{1,2} 王清³

LI Yuqing^{1,2} LU Lixin^{1,2} WANG Qing³

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097)

(1. School of Mechanical and Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Food Advanced Manufacturing Equipment Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 3. Institute of Agricultural Product Processing and Food Nutrition, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

摘要:目的:解决西兰花采后黄化变色和品质保鲜问题。

方法:采用不同质量浓度(0, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mg/L)的二氧化氯(ClO₂)气体于 23 ℃ 下对西兰花进行熏蒸处理,测定采后西兰花贮藏 0, 2, 4, 6, 8 d 时的感官、颜色、黄化级别以及生理生化指标和相关褐变酶的活性。**结果:**与对照组相比,不同质量浓度 ClO₂ 均可抑制西兰花的质量损失率、黄化褐变和花蕾的腐败变质;0.5, 1.0 mg/L 的 ClO₂ 对西兰花的叶绿素含量和色差值 a^* 、 b^* 的维持以及 PPO、POD 酶活性的抑制作用更为显著;其中 0.5 mg/L 的 ClO₂ 对西兰花花蕾色差值的保持效果最佳,且贮存第 8 天时黄化级别仍为 II 级,同时有效维持了维生素 C 含量,延缓了花蕾的黄化褐变。**结论:**采用 ClO₂ 气体对西兰花进行熏蒸处理需控制其浓度以获得维持采后西兰花花球鲜绿和延长货架寿命的最佳效果。

关键词:西兰花;二氧化氯;颜色检测;护色;贮藏品质

Abstract: Objective: This study aimed to solve the problems of yellowing, discoloration and quality preservation of broccoli after harvesting. **Methods:** Broccoli was fumigated with chlorine dioxide gas at different mass concentrations (0, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mg/L) at 23 ℃, and the sensory, color, yellowing grade, physiological and biochemical indexes and related browning enzyme activities of broccoli were determined after 0, 2,

4, 6, 8 days of storage. **Results:** Compared with the control group, different mass concentrations of ClO₂ could inhibit the mass loss rate, yellowing browning and spoilage of flower buds of broccoli. ClO₂ at 0.5 and 1.0 mg/L had a more significant effect on the maintenance of chlorophyll content, color difference a^* and b^* , and the inhibition of PPO and POD enzyme activities in broccoli. Among them, 0.5 mg/L ClO₂ had the best effect on maintaining the color difference value of broccoli flower buds, and the yellowing grade was still grade II on the 8th day of storage. Simultaneously, it effectively maintained the vitamin C content and delayed the yellowing and Browning of flower buds. **Conclusion:** It is necessary to control the concentration of ClO₂ gas in the fumigation treatment of broccoli to obtain the best effect of maintaining the fresh green of broccoli bulbs and extending the shelf life.

Keywords: broccoli; chlorine dioxide; color detection; color protection; storage quality

西兰花属于十字花科类蔬菜,又称为西蓝花、绿色花椰菜等,其富含蛋白质、矿物质和维生素等^[1]。西兰花在采摘后呈现强烈的呼吸代谢活性,属于呼吸跃变型蔬菜^[2]。常温下,新鲜的西兰花在 3 d 内就会从绿色转变为黄色,失去水分并引起枯萎,同时也会流失大量的营养成分,并产生消费者难以接受的气味^[3]。

对于消费者而言,西兰花花蕾的黄化变色是一个重要的质量特征^[4],而颜色变化主要由花球的黄化和褐变引起^[5]。其中褐变可分为酶促和非酶促两种类型^[6],非酶促褐变多发生在制品加工和贮存过程中,而贮存和销售过程中的变色主要为酶促褐变。酶促褐变是由酚类化

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助(编号:CARS-23)

作者简介:李宇晴,女,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:卢立新(1966—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: lulx@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2023-11-10 **改回日期:**2024-03-13

合物在酚酶的催化下形成醌类化合物,随后醌类物质积累、聚合和氧化,导致褐变^[7]。采用物理预冷、辐照或化学抑制剂可抑制果蔬褐变。化学抑制剂中的二氧化硫和亚硫酸盐曾被广泛应用^[8],但后续研究发现其对人体有害。因此寻找其他高效安全的褐变抑制剂替代亚硫酸盐,如1-甲基环丙烯^[9]、二氧化氯^[10]、含钙化合物、抗坏血酸及其衍生物^[11]等成为研究热点。

二氧化氯(ClO₂)被联合国卫生组织列为A1级安全消毒剂,无残留、无副作用,对多种果蔬的采后病害有抑制效果^[12],同时该气体具有较好的扩散性、穿透性和均匀性,能进入蔬菜的隙缝和其他难以到达的区域^[13]。王永红^[14]研究发现,不同比例气调结合ClO₂处理能够较好地维持西兰花的叶绿素含量并抑制发霉现象;高佳等^[15]研究发现,ClO₂水溶液清洗、浸渍西兰花后,能够维持花蕾外观品质并具有杀菌效果。目前,对ClO₂的研究主要集中在其抗菌消毒性^[16],如探究ClO₂对葡萄的抑菌效果^[17]、ClO₂浸泡液对仔姜的杀菌护色作用^[18],而针对绿色蔬菜护色效果的研究较少。

研究拟采用不同浓度的ClO₂处理西兰花,通过测定贮藏期间花蕾品质指标数据,结合图像分析系统评测颜色变化,综合确定对延迟黄化褐变及衰老霉变有效的ClO₂处理浓度,为保障西兰花的营养品质,进而为抑制西兰花黄化褐变及延长货架期提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

西兰花:采摘后立即冷链车运回江南大学实验室,贮藏于5℃保温箱中备用,挑选花球大小一致、无明显病虫害、无机械损伤的西兰花,并对球茎部位进行切割处理,保持花球下仍有2~3片叶片,贮存过程中花球朝上放置,江苏省无锡市滨湖区周新市场;

石英砂、碳酸钙、95%乙醇、乙二胺四乙酸、氨水、硫酸、无水草酸、偏磷酸、冰乙酸、盐酸(分析纯)、甲醇、邻苯二酚、聚乙二醇6000(PEG 6000)、聚乙烯吡咯烷酮(PVPP)、曲拉通-100、30%过氧化氢;国药集团化学试剂有限公司;

钼酸铵:纯度98%,北京伊诺凯科技有限公司;

无水醋酸钠:纯度99%,上海百灵威化学技术有限

公司;

愈创木酚:纯度99%,上海泰坦科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:AB204-N型,梅特勒—托利多仪器有限公司;

紫外分光光度计:UV-1800型,日本岛津公司;

人工气候箱:RQH-350型,上海右一仪器有限公司;

pH计:ST5000型,美国奥豪斯公司;

高速冷冻离心机:LC-LX-HR165A型,上海一恒科学仪器有限公司;

电热恒温水浴锅:HWS12型,昆山一恒仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理 挑选形状规整、重量近似的西兰花,称重。称取亚氯酸钠、柠檬酸于培养皿后加入10 mL水激发反应生成ClO₂。将含有反应溶液的培养皿置于1.9 L密闭保鲜盒内,扣紧盒盖。根据Ray^[19]的方法抽取气体测试容器内ClO₂浓度。待亚氯酸钠反应完全后,将每颗西兰花单独置于各密闭保鲜盒内,并于23℃恒温恒湿箱内贮存。

设计ClO₂质量浓度为0,0.2,0.5,1.0,1.5,2.0 mg/L,对照组未进行熏蒸处理。每2 d取样测定相关指标。

1.3.2 质量损失率测定 采用差量法,按式(1)计算失重率。

$$R_M = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_M ——失重率,%;

M_0 ——贮藏前西兰花平均质量,g;

M ——不同贮藏时间西兰花平均质量,g。

1.3.3 感官评价 由专业品评小组对西兰花的色泽、气味、组织状态、腐败情况和花蕾开放程度进行评判,采取9分制,得分取平均值。评分标准参照刘泽松等^[20]的方法,感官评分低于5分则认为西兰花基本失去商品性,评判标准见表1。

1.3.4 色差测定 采用数码相机获取西兰花彩色图片,结合软件提取颜色信息进行综合分析。

表1 西兰花感官评分标准

Table 1 Broccoli sensory scale

色泽	气味	组织状态	腐败情况	花蕾开放程度	评分
花球整体鲜绿	特有清香味	花球组织紧密	无腐烂	花蕾无开放	9
不超过10%花蕾变黄	轻度清香味	花球组织致密,硬挺	不超过5%花蕾出现斑点	不超过10%花蕾开放	7
10%~30%花蕾变黄	无清香味	花球外延稍软,中心组织疏松	5%~10%花蕾出现斑点	10%~30%花蕾开放	5
30%~50%花蕾变黄	轻度异味	花球萎蔫超过50%	10%~20%花蕾出现斑点	30%~50%花蕾开放	3
超过50%花蕾变黄	明显腐臭味	花球全部萎蔫	超过20%花蕾出现斑点	超过50%花蕾开放	1

搭建如图 1 所示的试验装置和采集系统。固定测试时间对西兰花花蕾进行图像采集,使用数码相机垂直获取花蕾数字彩色图像。拍摄时,西兰花置于铺设白色纸张的背景上,用 2 个矩形稳定提供光亮的灯管照明。所有测量进行 3 次重复。花蕾图像分析使用 Adobe Photoshop 和 Matlab 软件。使用 Adobe Photoshop 软件对图片尺寸和像素进行处理,图片分辨率为 150 dpi,裁切西兰花花蕾部分,图片统一调整至直径为 34.5 cm 的圆形(能够包含整个花球)。使用 Matlab 软件提取图片的 RGB 值。通过推导^[15]将 RGB 值转化为线性 XYZ 颜色空间,最后转化为 Lab 值。

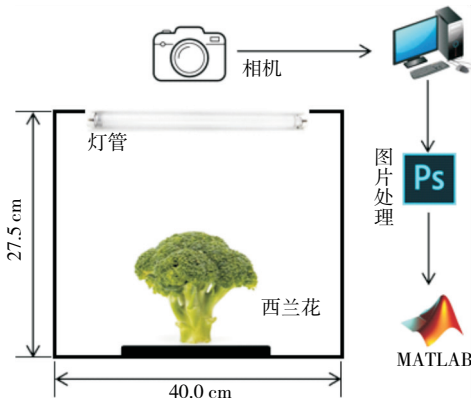


图 1 试验装置和图像采集系统

Figure 1 Experimental device and image acquisition system

使用 Matlab 软件提取转化 Lab 值过程中, L^* 值有一定的误差。因灰度化算法过程中会失去原始图像部分对比度信息^[21]。同时 RGB 和 Lab 转换过程中涉及到系数矩阵的近似取值处理,造成部分原图像的 L^* 颜色信息丢失。同时 L^* 值代表亮度,易受照明条件影响,无法提供颜色饱和度和色相信息。因此,试验主要分析 a^* 和 b^* 值变化。

1.3.5 叶绿素含量、维生素 C 含量测定

(1) 叶绿素含量:参照曹建康等^[22]的方法。

(2) 维生素 C 含量:采用钼酸铵比色法^[23]。

1.3.6 PPO 酶、POD 酶活性测定 参照曹建康等^[22]的方法并修改,西兰花花蕾组织样品取样调整为 2.0 g。分别以测定条件下 1 g 样品 1 min 引起 420,470 nm 吸光值变化 1 为 PPO 酶、POD 酶 1 个酶活力单位(U)。

1.3.7 总酚含量测定 参照曹建康等^[22]的方法。

1.3.8 黄化级别评价 参照 Olarte 等^[24-25]的方法并修改,颜色评级判断方法见表 2。

使用 Matlab 软件提取图片的 Lab 值。当 $a > -5$ 且 $b > 10$ 时则认定该区域为黄化区域,并计算黄化面积和花蕾面积,按式(2)计算评定黄化级别。

表 2 西兰花黄化级别评分标准

Table 2 Scoring standard of broccoli yellowing grade

级别	状态
I 级	墨绿色;深绿色,新鲜,花瓣紧致,不开花;黄化花蕾面积 < 5%
II 级	浅绿色;浅绿色,不开花;黄化花蕾面积 5%~15%
III 级	黄绿色;小花轻度黄化,黄化花蕾面积 15%~25%
IV 级	黄色;黄化花蕾面积 25%~50%
V 级	黄色;变黄花蕾面积 > 50%

$$R_s = \frac{S_1}{S} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

R_s ——黄化率,%;

S_1 ——黄化花蕾面积, cm^2 ;

S ——整颗花蕾面积, cm^2 。

1.4 数据处理

所有试验重复 3 次,采用 Excel 2019 软件进行统计分析,采用 Origin 2018 软件进行图形绘制。

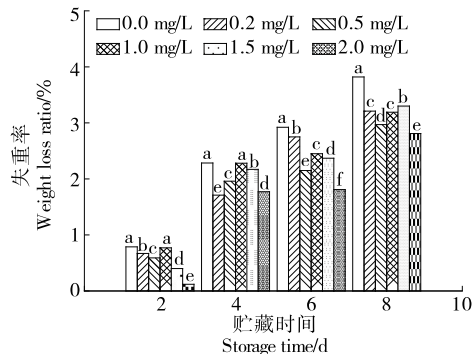
2 结果与分析

2.1 对西兰花质量损失率的影响

由图 2 可知,随着贮藏时间的延长,西兰花的质量损失率逐渐增大。贮藏第 8 天,未处理组的质量损失率为 3.83%。而使用 ClO_2 处理后能够在一定程度上抑制失水失重。与对照组和其他处理组相比,0.2 mg/L ClO_2 处理组对失重率的控制无明显差异,而 0.5,2.0 mg/L ClO_2 处理组的失重率显著降低,且第 8 天的失重率较对照降低了 26% ($P < 0.05$),说明该质量浓度 ClO_2 处理对花蕾的失水失重有一定抑制作用。

2.2 对西兰花感官评价的影响

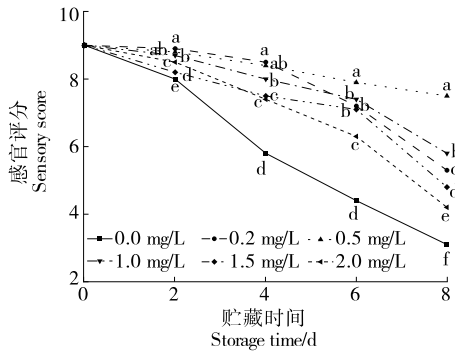
由图 3 可知,贮藏第 2~4 天,未处理组的西兰花花



小写字母不同表示同一时间点不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 不同质量浓度 ClO_2 气体处理对西兰花质量损失率的影响

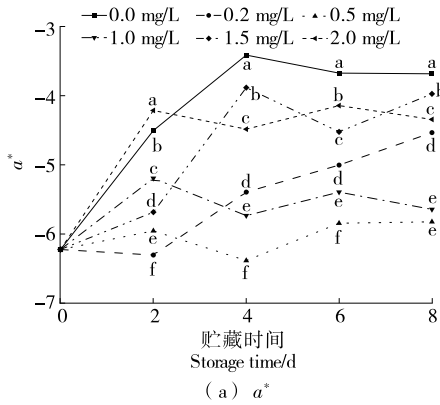
Figure 2 Influence of different mass concentrations of ClO_2 gas treatment on mass loss rate of broccoli



小写字母不同表示同一时间点不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同质量浓度 ClO_2 气体处理对西兰花感官评分的影响

Figure 3 Effects of ClO_2 gas treatment at different mass concentrations on sensory scores of broccoli



小写字母不同表示同一时间点不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同质量浓度 ClO_2 气体处理对西兰花 a^* 、 b^* 值的影响

Figure 4 Effects of ClO_2 gas treatment at different mass concentrations on a^* and b^* values of broccoli

a^* 值的维持效果较好, 贮藏第 8 天, 0.5 mg/L ClO_2 处理组的 a^* 值为未处理组的 1.58 倍, 延缓了花蕾色差变化。贮藏 2 d 后, 未处理组的 b^* 值一直保持最高, 其中 0.2, 2.0 mg/L ClO_2 处理组的较高, 表明 ClO_2 质量浓度过低或过高对花蕾的护色效果均不佳。贮藏结束时, 0.5 mg/L ClO_2 处理组的 b^* 值较未处理组的低 37%, 1.0 mg/L ClO_2 处理组的 b^* 值较未处理组的低 26%。0.5 mg/L ClO_2 处理组的颜色变化最小, 与感官评价结果一致, 是由于适宜质量浓度 ClO_2 处理能够延缓叶绿素的分解同时抑制褐变反应酶的活性^[10]。

由图 5 可知, 贮存第 8 天, 未处理组和 0.2 mg/L ClO_2 处理组的花蕾出现发霉变质现象, 进一步证实 ClO_2 对减缓微生物生长和维持西兰花的新鲜度具有积极作用。

2.4 对西兰花叶绿素、维生素 C 含量的影响

由图 6(a) 可知, 未处理组西兰花的叶绿素含量自贮

蕾出现泛黄、开花现象, 并产生轻微异味。2.0 mg/L ClO_2 处理组的西兰花出现褪色、泛白现象, 主要是由于高浓度的 ClO_2 会放出原子氧和产生次氯酸盐造成色素分解^[26], 导致果实表面“漂白”现象, 与 Sy 等^[27] 的研究结论一致。贮藏第 4~6 天, 0.2, 0.5, 1.0 mg/L ClO_2 处理组能够维持西兰花的感官品质。贮藏第 8 天, 对西兰花感官品质维持最好的为 0.5 mg/L ClO_2 处理组, 其感官评分为 7.5 分, 是未处理组的 2.5 倍 ($P < 0.05$)。综上, 0.5 mg/L ClO_2 处理能减少乙烯生成并影响微生物的细胞代谢, 达到保鲜效果。

2.3 对西兰花颜色变化的影响

由图 4 可知, 贮藏期间, 各组 a^* 值整体呈上升趋势, 特别是未处理组和 0.2 mg/L ClO_2 处理组 ($P < 0.05$), 这与叶绿素的降解有关。0.5, 1.0 mg/L ClO_2 处理组对

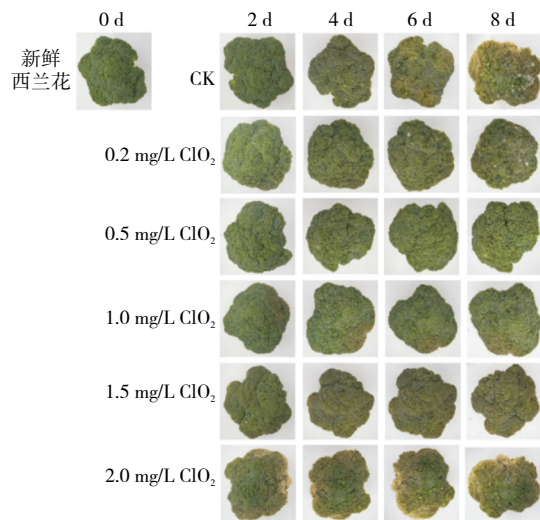
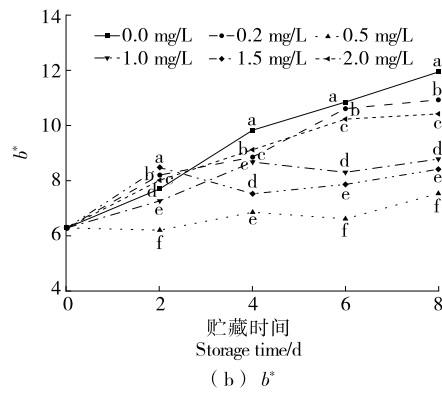


图5 不同处理组西兰花贮藏期间的图片

Figure 5 Pictures of broccoli during storage in different treatment groups

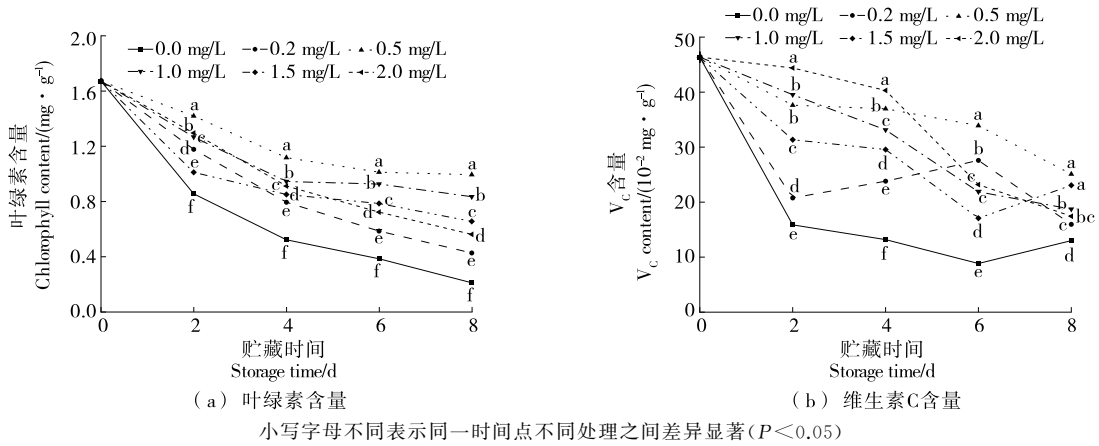


图 6 不同质量浓度 ClO₂ 气体处理对西兰花叶绿素、维生素 C 含量的影响

Figure 6 Effects of ClO₂ gas treatment at different mass concentrations on chlorophyll and V_c content in broccoli

藏开始总体呈下降趋势,贮藏 2 d 后,叶绿素快速降解,褪绿现象较为严重;而处理组在贮藏期间叶绿素含量显著高于未处理组 ($P < 0.05$)。贮藏结束时,处理组的叶绿素含量最高为未处理组的 4.6 倍。0.5 mg/L ClO₂ 处理组可以延缓西兰花叶绿素含量的下降,维持花球鲜绿。这是由于 ClO₂ 具有抑菌和抗氧化功能,能抑制微生物的生长、减缓氧化应激对叶绿素的分解破坏^[12]。

由图 6(b) 可知,贮藏期间,西兰花的维生素 C 含量呈先升高后下降趋势。ClO₂ 处理组的西兰花在贮藏 0~4 d 的维生素 C 含量变化较小。ClO₂ 处理能够抑制呼吸作用和维生素 C 的氧化及分解,与 Liu 等^[28] 的结论一致。这可能是由于 ClO₂ 处理能够抑制抗坏血酸氧化酶活性,从而减缓了维生素 C 被催化氧化过程。因此,贮藏结束时,处理组的维生素 C 含量显著高于未处理组 ($P < 0.05$)。

2.5 对西兰花 PPO 酶、POD 酶活性的影响

多酚氧化酶(PPO)是植物多样化呼吸电子传递链中重要的末端氧化酶,可以参与胁迫条件下呼吸代谢的调

节^[29]。西兰花贮藏过程如有机械损伤、病原侵袭,PPO 酶活性会显著增强。由图 7(a)可知,各组 PPO 酶活性呈上升趋势,在贮藏第 4 天达到最大值,未处理组的 PPO 酶活性较高,贮藏结束时,处理组的酶活性比未处理组的降低了 14.7%~58.1%。ClO₂ 处理会影响 PPO 酶的活性位点结构,进而抑制 PPO 酶活性上升^[30]。

POD 酶是一种导致果蔬酶促褐变的关键酶,在 H₂O₂ 存在下会催化酚类物质氧化,导致色素的产生和果蔬花青褐变^[31]。由图 7(b)可知,ClO₂ 处理组的 POD 酶活性在贮藏第 2, 6, 8 天均低于未处理组 ($P < 0.05$)。贮藏第 8 天,与未处理组相比,1.0, 0.5 mg/L ClO₂ 处理组的 POD 酶活性分别降低了 66%, 56.19%, 表明使用该质量浓度的 ClO₂ 熏蒸对西兰花 POD 酶活性的上升有较好的抑制作用 ($P < 0.05$)。

2.6 对西兰花总酚含量的影响

多酚类物质含量反映了西兰花抗氧化能力的强弱^[32]。西兰花在生长发育过程中会合成酚类物质,而后

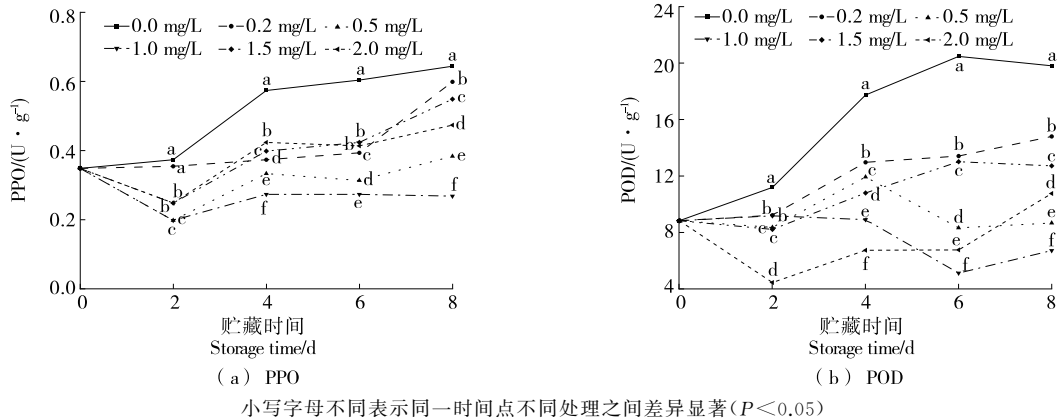


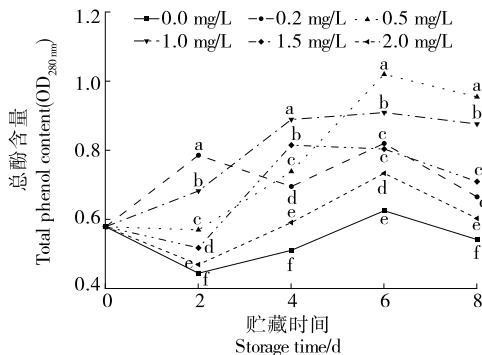
图 7 不同质量浓度 ClO₂ 气体处理对西兰花 PPO 酶、POD 酶活性的影响

Figure 7 Effects of ClO₂ gas treatment at different mass concentrations on PPO enzyme and POD enzyme activities in broccoli

期酚类物质在酶的作用下被氧化成醌类物质(黄化褐变现象)或者微生物侵染导致花蕾组织腐败引起汁液外流,总酚含量也随之下降。由图8可知,未处理组总酚含量显著低于处理组($P < 0.05$)。2.0 mg/L ClO_2 处理组对总酚含量的维持较0.5 mg/L ClO_2 处理组的差,可能是 ClO_2 质量浓度过高致使西兰花花蕾膜酯化衰老,加快了西兰花的成熟腐烂,与赵治兵等^[10]的研究结果一致。贮藏结束时,0.5,1.0 mg/L ClO_2 处理组能够较好地抑制西兰花总酚含量的下降。 ClO_2 熏蒸处理能抑制PPO、POD酶活力,减缓酚类物质氧化,从而延缓总酚含量下降^[33]。 ClO_2 可通过维持总酚含量以及非酶抗氧化物质含量,提升自由基清除能力,进一步达到减缓西兰花花蕾的褐变,维持西兰花品质。

2.7 对西兰花黄化的影响

由表3可知,贮藏期间,未处理组较快出现黄化,黄化区域逐渐扩大,最后发生霉变、腐败现象,不符合销售要求。0.5,1.0 mg/L ClO_2 处理组在贮藏0~6 d保持在Ⅱ级,0.5 mg/L ClO_2 处理组在贮藏第8天时尚符合Ⅱ级



小写字母不同表示同一时间点不同处理之间差异显著($P < 0.05$)

图8 不同质量浓度 ClO_2 气体处理对西兰花总酚含量的影响

Figure 8 Effects of ClO_2 gas treatment at different mass concentrations on total phenol content in broccoli

表3 贮存期间西兰花黄化级别变化

Table 3 Changes of yellowing level during storage of broccoli

ClO_2 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	第0天	第2天	第4天	第6天	第8天
0	I级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	V级
0.2	I级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅳ级	V级
0.5	I级	I级	I级	Ⅱ级	Ⅱ级
1.0	I级	I级	Ⅱ级	Ⅱ级	Ⅲ级
1.5	I级	I级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅲ级
2.0	I级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅲ级	Ⅳ级

标准,可满足销售要求。0.2 mg/L ClO_2 处理组因 ClO_2 质量浓度低,抑菌和抗氧化效果较差,难以有效抑制叶绿素分解,仅在贮藏0~4 d维持花蕾绿色,后较快出现黄化霉变,黄化区域超过30%。而1.5,2.0 mg/L ClO_2 处理组因 ClO_2 质量浓度过高破坏了植物细胞结构、造成局部花蕾色素分解,影响整体护色效果。

3 结论

研究对采后西兰花进行了二氧化氯气体熏蒸处理,并分析了不同质量浓度二氧化氯对西兰花花蕾护色保鲜的影响。结果表明,在23℃常温贮藏下,二氧化氯处理能抑制西兰花质量损失和黄化腐败现象,0.5,1.0 mg/L 二氧化氯处理组对叶绿素、总酚含量的维持和PPO酶、POD酶活性的抑制效果优于0.2,2.0 mg/L 二氧化氯处理组。其中0.5 mg/L 二氧化氯处理对花蕾的护色效果更显著,有效延缓了花蕾黄化级别,可将货架期延长至8 d,且贮藏第8天可保持与未处理组贮藏第3天相似的口感品质。该研究仅讨论了二氧化氯熏蒸处理质量浓度,未涉及应用方式,后续可开展基于二氧化氯释放的活性包装研究。

参考文献

- [1] YAN L, ZHOU G, SHAHZAD K, et al. Research progress on the utilization technology of broccoli stalk, leaf resources, and the mechanism of action of its bioactive substances[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1138700.
- [2] 李长亮, 冯毓琴, 魏丽娟, 等. 1-甲基环丙烯在西兰花贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 299-304.
LI C L, FENG Y Q, WEI L J, et al. The application of 1-methylcyclopene in the storage and fresh-keeping of broccoli[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(4): 299-304.
- [3] LU J Y, WU J, ZUO J H, et al. Effect of Se treatment on the volatile compounds in broccoli[J]. *Food Chemistry*, 2017, 216: 225-233.
- [4] SÁNCHEZ-VEGA R, RODRÍGUEZ-ROQUE M J, ELEZ-MARTÍNEZ P, et al. Impact of critical high-intensity pulsed electric field processing parameters on oxidative enzymes and color of broccoli juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(3): 14362.
- [5] 于皎雪, 胡文忠, 赵曼如, 等. 鲜切西兰花保鲜技术研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(15): 288-293.
YU J X, HU W Z, ZHAO M Y, et al. Research progress on preservation technology for fresh-cut broccoli [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(15): 288-293.
- [6] WANG C, ZHANG X L, GAO Y, et al. Path analysis of non-enzymatic browning in Dongbei Suancai during storage caused by different fermentation conditions [J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127620.
- [7] 周亨乐, 王富海, 易俊洁, 等. 化学抑制剂对果蔬食品多酚氧化

- 酶性质影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 253-260.
- ZHOU H L, WANG F H, YI J J, et al. Research progress on the effect of chemical inhibitors on the properties of polyphenol oxidase in fruits and vegetables [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(4): 253-260.
- [8] LI Z B, HUANG J, WANG L, et al. Novel insight into the role of sulfur dioxide in fruits and vegetables: Chemical interactions, biological activity, metabolism, applications, and safety[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(1): 1-25.
- [9] 张明昊, 叶正文, 骆军, 等. 1-MCP 处理结合低温贮藏对早生新水梨采后生理及品质的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 127-133, 209.
- ZHANG M H, YE Z W, LUO J, et al. Effects of 1-MCP combined with low temperature storage on postharvest physiology and quality of Zaoshengxinshui pear[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 127-133, 209.
- [10] 赵治兵, 刘永玲, 李莹, 等. 二氧化氯浓度对翠红李贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 153-157.
- ZHAO Z B, LIU Y L, LI Y, et al. Effect of chlorine dioxide concentration on storage quality of Cuihong plum [J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 153-157.
- [11] ZHAO X Y, GUO S, MA Y, et al. Ascorbic acid prevents yellowing of fresh-cut yam by regulating pigment biosynthesis and energy metabolism[J]. Food Research International, 2022, 157: 111424.
- [12] ZHANG Y, QIU J, YANG K, et al. Generation, mechanisms, kinetics, and effects of gaseous chlorine dioxide in food preservation[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 3 105-3 129.
- [13] 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: 18-26.
- [14] 王永红. CO₂ 气体调节剂结合 ClO₂ 对西兰花常温保鲜效果的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020: 38-43.
- WAN Y H. Study on shelf-keeping effect of CO₂ gas regulator combined with ClO₂ on broccoli [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020: 38-43.
- [15] 高佳, 斯跃洲, 朱永清, 等. 二氧化氯水溶液清洗对鲜切西兰花冷藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(3): 24-30.
- GAO J, SI Y Z, ZHU Y Q, et al. Effect of chlorine dioxide solution cleaning on the cold storage quality of fresh-cut broccoli [J]. Storage and Process, 2019, 19(3): 24-30.
- [16] GE Y X, LEI Y, LEI X, et al. Exploration of reaction rates of chlorine dioxide with tryptophan residue in oligopeptides and proteins[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 93: 129-136.
- [17] 江涛, 程传松, 郭凤婷, 等. 气体二氧化氯对葡萄杀菌效果及品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 161-168.
- JIANG T, CHENG C S, GUO F T, et al. Effect of gaseous chlorine dioxide on bacterial inactivation and quality of grapes[J]. Food Science, 2023, 44(5): 161-168.
- [18] 唐继兴, 徐斌, 赵焱焱, 等. 二氧化氯对仔姜保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 316-321.
- TANG J X, XU B, ZHAO Y Y, et al. Effect of chlorine dioxide treatment on the preservation effect of tender ginger[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 316-321.
- [19] RAY S, JIN T, FAN X T, et al. Development of chlorine dioxide releasing film and its application in decontaminating fresh produce [J]. Journal of Food Science, 2013, 78(2): 276-284.
- [20] 刘泽松, 史君彦, 左进华, 等. UV-C 和 LED 红光复合处理对西兰花贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 238-245.
- LIU Z S, SHI J Y, ZUO J H, et al. Effect of combined UV-C and red light emitting diode irradiation on storage quality of broccoli [J]. Food Science, 2020, 41(17): 238-245.
- [21] 顾梅花, 苏彬彬, 王苗苗, 等. 彩色图像灰度化算法综述[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(5): 1 286-1 292.
- GU M H, SU B B, WANG M M, et al. Survey on decolorization methods[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(5): 1 286-1 292.
- [22] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 38-104.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 38-104.
- [23] 张洪军, 潘艳娟, 王建清. 大蒜/肉桂精油复配 PE 膜对双孢菇的保鲜研究[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(4): 21-25.
- ZHAO H J, PAN Y J, WANG J Q. Study on Agaricusbisporus fresh-keeping effect by garlic/cinnamon essential oil compound PE film[J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(4): 21-25.
- [24] OLARTE C, SANZ S, ECHÁVARRI F J, et al. Effect of plastic permeability and exposure to light during storage on the quality of minimally processed broccoli and cauliflower [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 402-411.
- [25] PEN L T, JIANG Y M. Effects of chitosan coating on shelf life and quality of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(3): 359-364.
- [26] HIRATA B S, BERGER S B, GUIRALDO R D, et al. Assessing the bleaching effect of an experimental stabilized chlorine dioxide agent used for internal bleaching purposes[J]. Brazilian Journal of Oral Sciences, 2022, 21(7): 1-8.
- [27] SY K V, MURRAY M B, HARRISON M D, et al. Evaluation of gaseous chlorine dioxide as a sanitizer for killing *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, and yeasts and molds on fresh and fresh-cut produce [J]. Journal of Food Protection, 2005, 68(6): 1 176-1 187.
- [28] LIU R, WANG J, HUANG C X, et al. Chlorine dioxide gas slow-release film for strawberry preservation[J]. LWT-Food Science & Technology, 2023, 177: 114595.

(下转第 172 页)

- phytochemical composition and antioxidant activity of purplefleshed potatoes[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 1 264-1 270.
- [16] 朱柏雨, 夏陈, 罗棵濒, 等. 四川黑茶多酚和咖啡碱含量及其抗氧化活性分析[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 25-32.
- ZHU B Y, XIA C, LUO K B, et al. Analysis of tea polyphenols and caffeine contents and their antioxidant activities of Sichuan dark tea[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 25-32.
- [17] O'SULLIVAN A, O'CALLAGHAN Y, O'GRADY M, et al. The effect of solvents on the antioxidant activity in Caco-2 cells of Irish brown seaweed extracts prepared using accelerated solvent extraction (ASE®) [J]. Journal of Function Foods, 2013, 5: 940-948.
- [18] DUAN H X, ZHOU C E, LI J H. Comparison of tea water extraction and ethanol-extraction extracting tea polyphenols from unfermented Pu-erh[J]. Southwest China Journal of Agricultural Science, 2013, 26(6): 2 503-2 508.
- [19] 赵大洲, 石蓓梅, 叶主虹. 茶多酚水提与醇提的比较研究[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(8): 69-71.
- ZHAO D Z, SHI B M, YE Z H. A comparison study on water extraction and alcohol-extraction of tea polyphenols [J]. Food Research and Development, 2007, 28(8): 69-71.
- [20] MARCANO D, HASEGAWA M. Fitoquímica orgánica [M]. Venezuela: Editorial Torino, 2002: 100.
- [21] ISMAIL B B, PU Y F, GUO M M, et al. HLC-MS/QTOF identification of phytochemicals and the effects of solvents on phenolic constituents and antioxidant activity of baobab (*Adansonia digitata*) fruit pulp[J]. Food Chemistry, 2019, 277: 279-288.
- [22] LU Q, JIANG M H, JIANG J G, et al. Isolation and identification of compounds from *Penthorum chinense* pursh with antioxidant and antihepatocarcinoma properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60: 11 097-11 103.
- [23] HE L B, ZHANG S Y, LUO C M, et al. Functional teas from the stems of *Penthorum chinense* pursh: Phenolic constituents, antioxidant and hepatoprotective activity [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2019, 74: 83-90.
- [24] 范玲, 谢星星, 陈立, 等. 赶黄草 3 种提取物对小鼠内毒素性肝损伤的保护作用[J]. 中成药, 2019, 41(2): 291-297.
- FAN L, XIE X X, CHEN L, et al. Protective effects of three *Penthorum chinense* extracts on endotoxin-induced liver injury in mice[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2019, 41 (2): 291-297.
- [25] 李杰, 蒋志涛, 刘晓燕, 等. 赶黄草药理作用及其质量标志物研究进展[J]. 南京中医药大学学报, 2019, 35(6): 757-760.
- LI J, JIANG Z G, LIU X Y, et al. Advances in pharmacological effect and Q-marker research of *Penthorum chinense*[J]. Journal of Nanjing University of Chinese Medicine, 2019, 35(6): 757-760.
- [26] 向卓亚, 夏陈, 朱永清, 等. 贮藏时间对雅安藏茶中活性成分及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 67-72.
- XIANG Z Y, XIA C, ZHU Y Q, et al. Effect of storage time on functional ingredient and antioxidant activity of Ya'an Tibetan tea [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 67-72.
- [27] 孙佩, 童文, 杨晓, 等. 赶黄草不同生育时期植株重量及有效成分含量变化研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(6): 2 666-2 668.
- SUN P, TONG W, YANG X, et al. Study on variation of plant weight and active component contents in *Herba penthori* at different growth stages[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(6): 2 666-2 668.
- [28] SUN Z L, ZHANG Y Z, FENG Z, et al. Quality assessment of *Penthorum chinense* pursh through multicomponent qualification and fingerprint, chemometric, and antihepatocarcinoma analyses[J]. Food & Function, 2018, 9(7): 3 807-3 814.
- [29] YIN J H, REN W, WEI B, et al. Characterization of chemical composition and prebiotic effect of a dietary medicinal plant *Penthorum chinense* pursh[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126568.
- [30] 周滢, 费曜. 川产赶黄草不同部位的槲皮素含量比较[J]. 世界科学技术(中医药现代化), 2014, 16(9): 2 047-2 049.
- ZHOU Y, FEI Y. Content comparison on quercetin from different parts of *Penthorum chinense* pursh from sichuan province [J]. World Science and Technology/Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica, 2014, 16(9): 2 047-2 049.
- [31] LIU F, NG T B. Antioxidative and free radical scavenging activities of selected medicinal herbs[J]. Life Science, 2000, 66: 725-735.
- Bioprocess Technology, 2023, 3 128: 1-26.
- [32] MAHN A, RUBIO M P. Evolution of total polyphenols content and antioxidant activity in broccoli florets during storage at different temperatures[J]. Journal of Food Quality, 2017, 2 017: 3742183.
- [33] 努尔开西·肉扎洪, 侯媛媛, 赵雅芹, 等. 二氧化氯熏蒸处理对蚕豆品质及褐变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 222-230.
- ROUZHAHONG N, HOU Y Y, ZHAO Y Q, et al. Effect of chlorine dioxide fumigation on quality and browning of broad beans[J]. Food Science, 2023, 44(1): 222-230.

(上接第 126 页)

- [29] HU H C, JING N N, PENG Y H, et al. ⁶⁰Co γ -ray irradiation inhibits germination of fresh walnuts by modulating respiratory metabolism and reducing energy status during storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 182: 111694.
- [30] FAN X. Chemical inhibition of polyphenol oxidase and cut surface browning of fresh-cut apples[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(27): 8 737-8 751.
- [31] RASANE P, SINGH J, KAUR S, et al. Strategic advances in the management of browning in fruits and vegetables[J]. Food and

- Bioprocess Technology, 2023, 3 128: 1-26.
- [32] MAHN A, RUBIO M P. Evolution of total polyphenols content and antioxidant activity in broccoli florets during storage at different temperatures[J]. Journal of Food Quality, 2017, 2 017: 3742183.
- [33] 努尔开西·肉扎洪, 侯媛媛, 赵雅芹, 等. 二氧化氯熏蒸处理对蚕豆品质及褐变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 222-230.
- ROUZHAHONG N, HOU Y Y, ZHAO Y Q, et al. Effect of chlorine dioxide fumigation on quality and browning of broad beans[J]. Food Science, 2023, 44(1): 222-230.