

## 高阻隔性薄膜包装对采后油菜品质及叶绿素降解的影响

安容慧<sup>1</sup>, 张媛琦<sup>2</sup>, 李岩<sup>3</sup>, 魏雯雯<sup>1</sup>, 王达<sup>1</sup>, 杨相政<sup>1</sup>, 贾连文<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 中华全国供销合作总社济南果品研究所 济南 250220

<sup>2</sup> 山东农业工程学院 食品科学与工程学院 山东淄博 255300

<sup>3</sup> 威海职业学院 山东威海 264200)

**摘要** 为探究高阻隔性薄膜包装对贮藏期间油菜品质和叶绿素降解的影响,采用3种高阻隔性的薄膜(P1、P2和P3)包装油菜,于(4±1)℃条件下贮藏,分析油菜表型、袋内气体成分、色泽、营养品质和叶绿素衍生物的变化。结果表明:与对照相比,高阻隔性薄膜包装可以减缓油菜的品质劣变进程及叶绿素降解,其中高阻隔性薄膜P1和P2可以维持袋内低O<sub>2</sub>高CO<sub>2</sub>的环境,显著抑制油菜L\*、a\*和b\*的升高,减缓类胡萝卜素、叶黄素、抗坏血酸和可溶性蛋白含量的下降,维持较高的叶绿素衍生物(叶绿素a、叶绿素b、脱植基叶绿素a、脱植基叶绿素b、脱镁叶绿素a和脱镁叶绿酸a)含量,在货架30d时总叶绿素含量分别比对照组高0.37 mg/g和0.40 mg/g,从而延缓了叶片黄化衰老。结论:高阻隔性薄膜P1和P2可以维持油菜较高的品质,抑制叶绿素降解,延长贮藏保鲜期15d以上。

**关键词** 高阻隔性薄膜; 油菜; 品质; 叶绿素降解

文章编号 1009-7848(2025)02-0365-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2025.02.032

油菜(*Brassica campestris* L.)属于十字花科芸薹属中白菜的一个变种,又称为小白菜,是典型的绿叶蔬菜,其营养价值高,含有人体所需的多种维生素和矿物质,具有防止溃疡、软化血管、缓解便秘等功能,经常食用还可以改善皮肤状态,对保护视力也有很好的效果,因而深受消费者喜爱<sup>[1-2]</sup>。然而,油菜叶绿素和水分含量高,呼吸作用旺盛,使其出现叶绿素降解、黄化褐变及水分流失等问题,严重缩短了货架期。研究油菜贮藏保鲜技术具有重要意义。

目前,采后绿叶菜保鲜方式有很多种,如采用化学手段,使用1-甲基环丙烯<sup>[3]</sup>、褪黑素<sup>[4]</sup>和臭氧<sup>[5]</sup>等保鲜剂浸泡或熏蒸处理绿叶菜,能有效减缓其黄化和感官品质的劣变。此外,通过物理手段,如真空预冷<sup>[6]</sup>、人工气调贮藏<sup>[7]</sup>和辐照<sup>[8]</sup>等技术可以延长绿叶蔬菜的贮藏保鲜期。然而,这些方法存在一定的局限性,如熏蒸和浸泡处理需要严格控制保鲜剂的浓度和熏蒸浸泡的时间,操作复杂,成本高,而真空预冷、人工气调贮藏等技术对专业设备

具有依赖性。探索开发具有操作便捷性、经济性和高效性的保鲜手段,对抑制油菜采后叶绿素降解与品质衰退现象,提升其贮藏稳定性具有重要作用。

自发气调包装(Modified atmosphere packaging)是根据不同果蔬的生理特性,利用果蔬自身的呼吸作用以及包装薄膜对不同气体的透过性,在包装袋内自发形成低O<sub>2</sub>和高CO<sub>2</sub>的气体环境,来降低果蔬的呼吸代谢强度,达到维持果蔬品质的目的<sup>[9]</sup>。自发气调成本低,操作简便,保鲜效果明显,被广泛应用于果蔬保鲜研究<sup>[10-11]</sup>。包装材料是气调包装中最重要的一环,目前高阻隔性塑料包装材料已成功用于速冻调理食品、生鲜肉品、高脂类制品等多个产品领域,采用高阻隔性塑料包装材料实施产品封装,可显著抑制环境氧分子及水汽渗透,维持内腔气体组分的稳定性,从而有效延长制品商业周转时间与保质期限。该技术体系在食品药品防护领域具有突出优势<sup>[12-13]</sup>。目前,还未有高阻隔性包装对蔬菜品质和黄化方面的相关研究。

本研究采用3种高阻隔性薄膜包装油菜,通过测定低温贮藏期间油菜品质和黄化相关指标的变化,探究高阻隔性薄膜对采后油菜品质的影响。

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021CXGC010809)

第一作者: 安容慧,女,硕士,助理研究员

通信作者: 贾连文 E-mail: lianweija@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

油菜采购于济南市农贸市场, 采购后 1 h 内运送至济南果品研究所实验室。选取颜色翠绿、无病虫害及机械损伤, 大小均匀的新鲜油菜。

抗坏血酸、氢氧化钾、磷酸二氢钾、氯化钾、硫酸铵、无水硫酸钠、草酸、碳酸氢钠、乙醚、石油醚、Tris、丙酮(分析纯级), 国药集团化学试剂有限公司; 2,6-二氯靛酚、考马斯亮蓝 G-250 (分析纯级), 上海麦克林生化科技有限公司; TritonX-100 (分析纯级), 德国默克公司; 乙醇(分析纯级), 天津市富宇精细化工有限公司; 正己烷(色谱纯级), 天津市大茂化学试剂厂; 叶绿素 a、叶绿素 b(色谱纯级), 上海源叶生物科技有限公司; 甲醇、乙酸乙酯(色谱纯级), 赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

### 1.2 仪器与设备

HP 200 色差仪, 上海汉谱光电科技有限公司; Check Point 便携式气体测定仪, 丹麦 PBI Dansensor; U3000 液相色谱仪, 赛默飞世尔有限公

司; UV-1800 紫外-可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; PERME W3/031 水蒸气透过率测试仪、CHY-CA 测厚仪, 济南兰光机电技术有限公司; TCL-1013 高速台式离心机, 上海安亭科学仪器厂; HJ-2A 磁力搅拌器, 常州苏瑞仪器有限公司; DW-HL290 超低温冷冻储存箱, 中科美菱低温科技股份有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 试验设计 4 个处理组, 采用 3 种高阻隔性薄膜 P1、P2 和 P3 包装油菜, 以市售普通聚乙烯薄膜包装作为对照组(Con), 包装袋的规格为 390 mm × 300 mm, 包装薄膜性能指标见表 1, 每袋油菜质量(300 ± 1)g, 采用热封机密封, 每个处理重复 3 次, 于(4 ± 1)℃条件下贮藏 30 d, 每 5 d 进行取样, 测定气体成分和色差值, 并取油菜的外叶 3 片采用液氮深低温固定处理样本后转移至超低温条件下(-80℃)进行样本贮藏, 用于后续生理生化测定。

表 1 包装薄膜的阻隔性

Table 1 Barrier property of packaging films

编号	厚度/ $\mu\text{m}$	水蒸气透过率/	氧气透过率/	二氧化碳透过率/
		$[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h})]$	$[(\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})]$	$[(\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa})]$
Con	20	14.45	5 988.03	17 433.36
P1	140	1.93	0.82	2.48
P2	135	2.12	0.99	3.44
P3	60	4.05	0.59	1.51

1.3.2 薄膜性能指标测定 薄膜厚度参考《塑料薄膜和薄片 厚度测定 机械测量法》(GB/T 6672-2001)中的方法测定。

薄膜透气性参考《塑料制品 薄膜和薄片 气体透过性试验方法 第 1 部分: 差压法》(GB/T 1038.1-2022)中的方法测定。

薄膜透湿性参考《塑料薄膜与薄片水蒸气透过性能测定 杯式增重与减重法》(GB/T 1037-2021)中的方法测定。

1.3.3 包装袋内气体成分 采用便携式气体测定仪测定包装袋内  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  含量, 每组处理重复测定 3 袋。

1.3.4 色差 采用 HP 200 手持式色差计进行色

差测定, 测试时选取每棵油菜外叶 3 片叶片, 在距离叶片最上方 1/3 主叶脉对称位置测定两个点。记录其参数  $L^*$ (亮度指标)、 $a^*$ (红绿色指标)、 $b^*$ (黄蓝色指标)。

1.3.5 总叶绿素、类胡萝卜素和叶黄素含量的测定 参考韦友欢等<sup>[14]</sup>和胡秉芬等<sup>[15]</sup>的方法, 称取 0.2 g 样品, 加入 10 mL 体积分数为 95% 的乙醇, 常温避光浸提, 采用分光光度计测定提取液在波长 470, 474, 485, 642, 665 nm 处的吸光度, 计算叶绿素、类胡萝卜素、叶黄素的含量。

1.3.6 抗坏血酸(VC) 参考国家标准《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》(GB 5009.86-2016)中的 2,6-二氯靛酚滴定法测定抗坏血酸含量。

1.3.7 可溶性蛋白 可溶性蛋白含量的测定参考 Bradford<sup>[16]</sup>的方法,略有改动。称取 0.5 g 样品,与 5 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 7.2)进行混匀,在低温(4 ℃)条件下 10 000×g 离心 15 min,取上清液加入蒸馏水和考马斯亮蓝 G-250,于波长 595 nm 处比色。

1.3.8 叶绿素衍生物的液相色谱分析 脱植基叶绿素 a 和 b、脱镁叶绿素 a 和脱镁叶绿酸 a 标准品的制备分别参考 Chen 等<sup>[17]</sup>、Pumilia 等<sup>[18]</sup>和 Sievers 等<sup>[19]</sup>的方法,并用液相色谱分析。

油菜叶绿素衍生物的提取参考 Maraiia 等<sup>[20]</sup>的方法,略有改动。取 0.5 g 样品,加入 10 mL 预冷丙酮,超声浸提,离心。取 5 mL 上清液,加入 5 mL 10%的 NaCl 溶液,10 mL 无水乙醚进行萃取,萃取后加超纯水 10 mL,轻轻晃动,弃掉下层,加入无水硫酸钠过滤,经氮吹仪吹干后,加入 2 mL 预冷丙酮,过 0.22 μm 有机滤膜转移到液相进样小瓶中。液相色谱条件参考 Huang 等<sup>[21]</sup>的方法。

#### 1.4 数据处理

所有数据均做 3 次平行,数据采用 SPSS 24 软件进行方差分析(ANOVA),Duncan 检验进行多

重比较,以  $P < 0.05$  为显著性检验标准,采用 Origin 64 软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 高阻隔性薄膜包装对采后油菜外观品质的影响

由图 1 可以看出,油菜采后经不同薄膜包装后其黄化进程差异显著。其中,对照组油菜黄化速度最快,在贮藏的第 20 天便出现了轻微黄化现象,25 d 时黄化严重,30 d 时部分叶片脱离并伴随腐烂现象的发生;其次黄化最快的是 P3 处理组,在贮藏第 25 天时出现轻微黄化现象,30 d 时黄化严重,失去商品价值;而 P1 和 P2 薄膜包装的油菜在贮藏的第 30 天仍具有良好的外观品质,与 0 d 相比无明显变化,在贮藏的 45 d 时仅有个别叶片有轻微发黄的现象。由此可见,3 种高阻隔性薄膜均可以延缓采后油菜叶片黄化进程,更好的保持油菜良好的外观品质;其中 P1 和 P2 薄膜对油菜的保鲜效果最佳,与对照组相比,可延长贮藏期 15 d 以上。

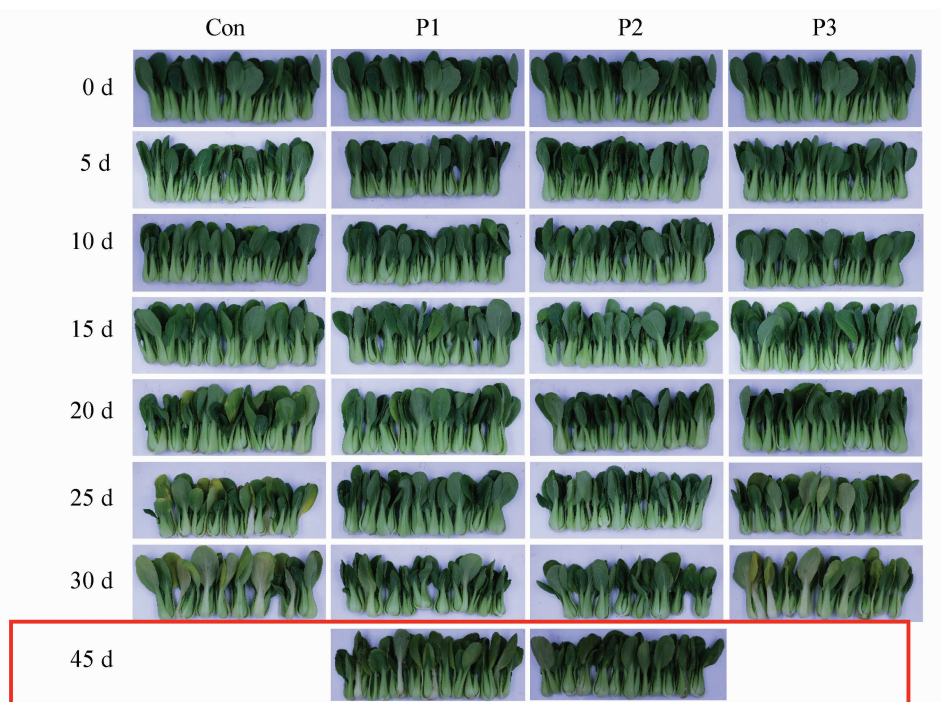


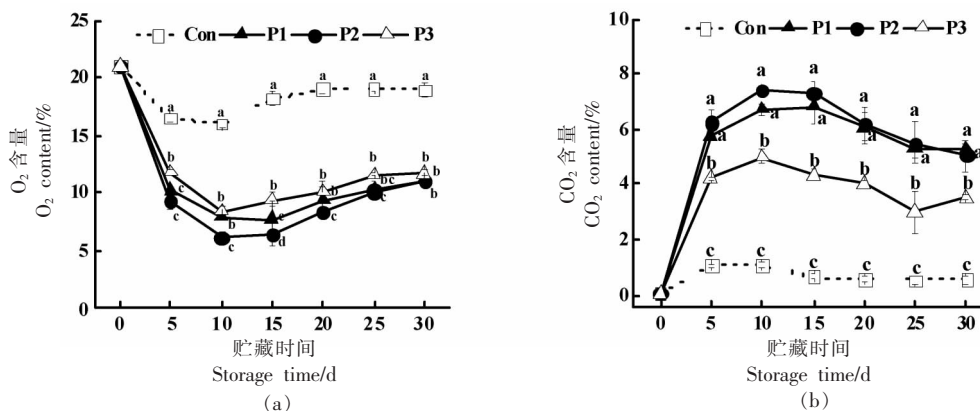
图 1 高阻隔性薄膜包装对采后油菜外观品质的影响

Fig.1 Effects of high barrier film packaging on phenotype of *Brassica campestris* L.

## 2.2 高阻隔性薄膜包装对袋内气体成分影响

采后油菜随着贮藏时间的延长,其包装袋内 $O_2$ 含量整体呈先下降后上升的趋势, $CO_2$ 含量呈先上升后下降的趋势(图2)。对照组始终维持着包装袋内较高的 $O_2$ 含量(16.53%~19.13%) and 较低的 $CO_2$ 含量(0.50%~1.06%);与对照组相比,高阻隔性薄膜P1、P2和P3可以显著降低贮藏期 $O_2$ 含量,提高 $CO_2$ 含量, $O_2$ 含量大小为:P3>P1>P2, $CO_2$ 含量大小为:P2>P1>P3;与P3相比,P1和P2薄膜对维持袋内低 $O_2$ 和高 $CO_2$ 的环境更有

效,在贮藏5d和15d,P1显著降低了 $O_2$ 含量,而在贮藏的5~25d,P2显著降低了 $O_2$ 含量( $P<0.05$ );在整个贮藏期内,P1和P2虽然均能显著的提高 $CO_2$ 含量( $P<0.05$ ),但两者之间无显著差异。可见,高阻隔性的薄膜能够减缓采后油菜的呼吸速率,其中P1、P2薄膜对袋内气体调控的作用更为显著,可以维持包装袋内低 $O_2$ 高 $CO_2$ 的环境,显著降低油菜采后的呼吸作用,减少营养物质的消耗。



注:不同小写字母表示表示不同处理组间存在显著差异( $P<0.05$ )。

图2 高阻隔性薄膜包装对袋内 $O_2$ (a)和 $CO_2$ (b)的含量变化

Fig.2 Effects of high barrier film packaging on  $O_2$  (a) and  $CO_2$  (b) contents in bags

## 2.3 高阻隔性薄膜包装对采后油菜 $L^*$ 值、 $a^*$ 值和 $b^*$ 值的影响

由图3可知,随着贮藏时间的延长,薄膜包装的油菜亮度( $L^*$ )、绿度( $a^*$ )和黄度( $b^*$ )值均呈升高的趋势,其中 $a^*$ 值越小表示颜色越绿, $b^*$ 值越小表示颜色越黄<sup>[22]</sup>。在整个贮藏过程中,对照组 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 呈显著增加的趋势( $P<0.05$ ),尤其在贮藏末期(15~30d),加速了叶片褪绿转黄。与对照组相比,P3组减缓了叶片 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 的升高,在贮藏30d时 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 分别比对照组低9.50%,14.91%和21.37%;与P3相比,P1和P2组可以显著降低油菜贮藏末期 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 的升高( $P<0.05$ )。由此可见,高阻隔性薄膜包装可以降低采后油菜亮度上升的幅度,减缓叶片黄化的速率,使采后油菜可以较长时间保持良好的色泽,延长其贮藏期,其中P1和P2薄膜的作用效果最明显。

## 2.4 高阻隔性薄膜包装对采后油菜类胡萝卜素和叶黄素含量的影响

类胡萝卜素和叶黄素是蔬菜是主要的抗氧化物质也是天然色素<sup>[23]</sup>。在贮藏过程中,组织中类胡萝卜素和叶黄素均有不同程度的损失(图4)。其中对照组油菜的类胡萝卜素含量的下降幅度最大,在贮藏的15~30d,高阻隔性薄膜可以显著减缓类胡萝卜素含量的下降( $P<0.05$ )。在贮藏30d时,对照组类胡萝卜素含量损失率达52.78%,而P1、P2和P3组的损失率分别为36.11%,38.89%和47.22%。可见,高阻隔性薄膜可以维持油菜较高的类胡萝卜素含量。

由图4b可知,油菜在贮藏前期(0~20d)各处理组间叶黄素的含量差异并不显著,在贮藏的20~30d高阻隔性薄膜P1和P2包装的油菜叶黄素含量显著高于P3和对照组( $P<0.05$ )。当贮藏

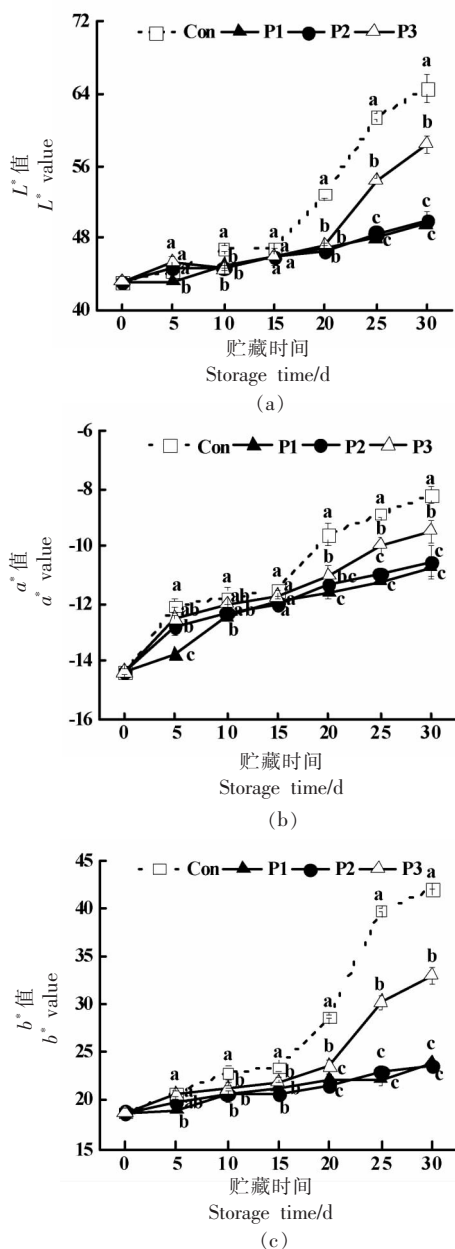


图 3 高阻隔性薄膜包装对采后油菜  $L^*$  值(a)、 $a^*$  值(b)和  $b^*$  值(c)的影响

Fig.3 Effects of high barrier film packaging on  $L^*$ (a),  $a^*$ (b) and  $b^*$ (c) values of *Brassica campestris* L.

到第 30 天时, 对照组油菜叶黄素含量损失率达 57.06%, 分别比 P1、P2 和 P3 组高 33.53%、27.65% 和 10.00%。可见, P1 和 P2 薄膜对抑制叶黄素的降解有明显的效果。

### 2.5 高阻隔性薄膜包装对采后油菜抗坏血酸和可溶性蛋白含量的影响

VC 是植物中重要的营养物质<sup>[24]</sup>。从图 5a 整

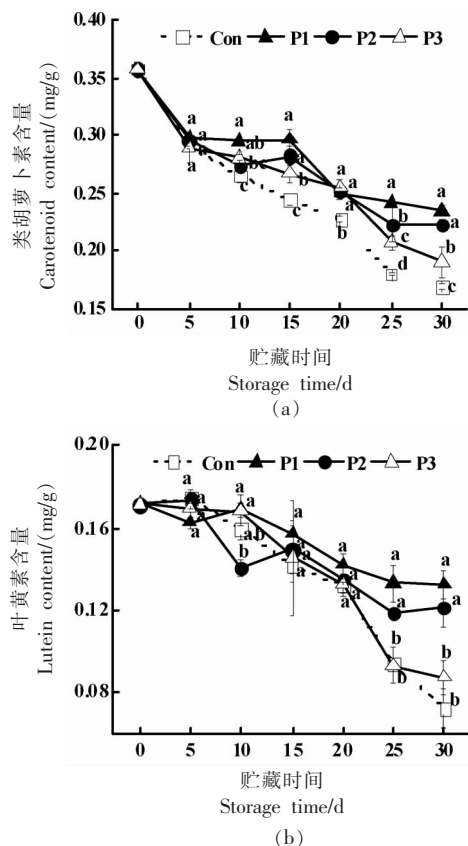


图 4 高阻隔性薄膜包装对采后油菜类胡萝卜素(a)和叶黄素(b)含量的影响

Fig.4 Effects of high barrier film packaging on carotenoid (a) and lutein (b) contents of *Brassica campestris* L.

体来看, 对照组油菜 VC 含量流失最快, 在贮藏 30 d 时, VC 含量仅为 0.07 mg/g, 损失率达 87.04%; 与对照组相比, 在贮藏中期(15~25 d)高阻隔性薄膜 P3 可以显著减缓 VC 的损失( $P < 0.05$ )。P1 和 P2 薄膜可以维持相对较高的 VC 含量, 尤其在贮藏的末期, 当油菜贮藏 30 d 时, P1 和 P2 薄膜包装的油菜 VC 含量分别比 P3 高 0.09 mg/g 和 0.08 mg/g, 分别比对照组高 0.13 mg/g 和 0.12 mg/g。可见, 高阻隔性薄膜 P1 和 P2 可以减缓油菜中 VC 的损失。

可溶性蛋白参与植物体内的能量代谢, 同时也代表着蔬菜的衰老程度<sup>[25]</sup>。由图 5b 可见, 油菜中可溶性蛋白含量的变化同抗坏血酸类似。在贮藏 30 d 时对照组可溶性蛋白含量仅为 4.77 mg/g, 下降最快; 其次, 可溶性蛋白损失较高的是 P3 薄膜包装的油菜; 而高阻隔性薄膜 P1 和 P2 可以显

著降低可溶性蛋白的损失( $P < 0.05$ ),在贮藏 30 d 时,可溶性蛋白含量分别为 11.58 mg/g 和 12.16 mg/g,分别比对照组高 58.81%和 60.77%。可见,高

阻隔性薄膜 P1 和 P2 可以减缓可溶性蛋白的下降。

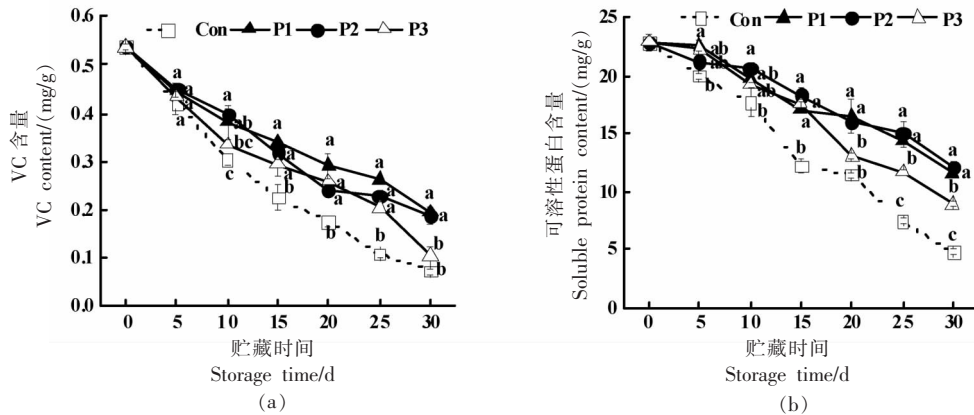


图 5 高阻隔性薄膜包装对采后油菜 VC(a)和可溶性蛋白(b)含量的影响

Fig.5 Effects of high barrier film packaging on VC (a) and soluble protein (b) contents of *Brassica campestris* L.

## 2.6 高阻隔性薄膜包装对采后油菜叶绿素含量的影响

叶绿素可以反应绿色蔬菜褪绿程度,叶绿素

包括叶绿素 a 和叶绿素 b<sup>[26]</sup>。随着贮藏时间的延长,油菜逐渐褪绿转黄,其叶绿素含量逐渐下降(图 6)。由于对照组叶片黄化快,其叶绿素 a、叶绿

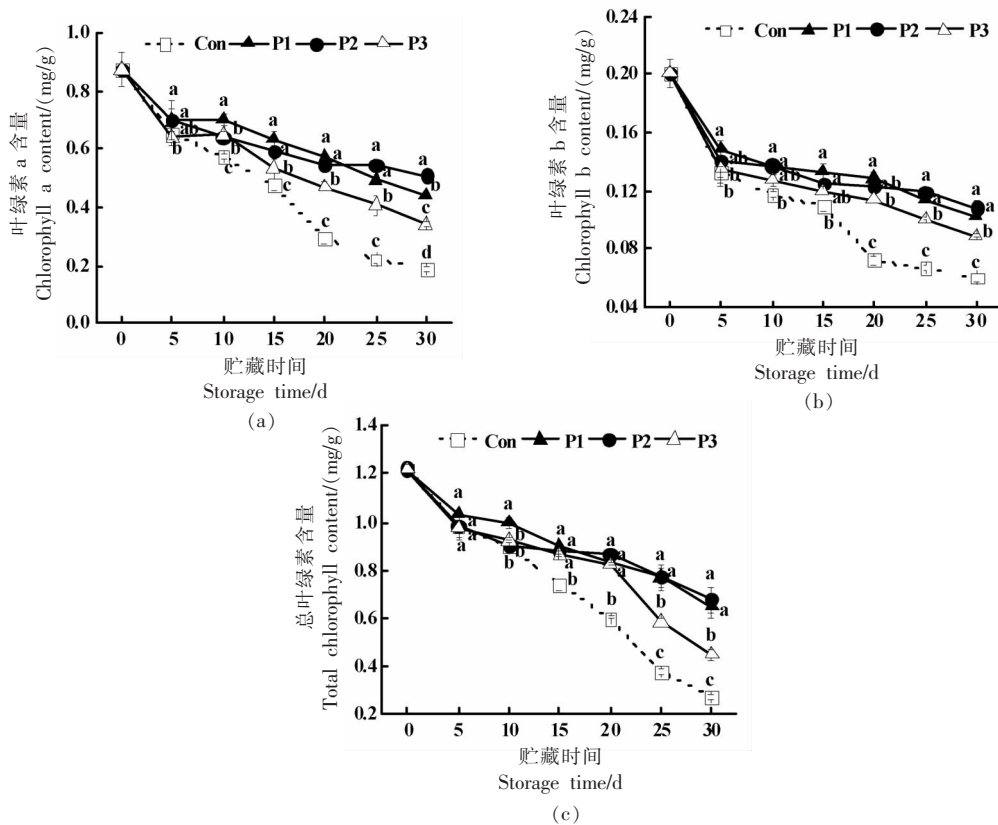


图 6 高阻隔性薄膜包装对采后油菜叶绿素 a(a)、叶绿素 b(b)和总叶绿素(c)含量的影响

Fig.6 Effects of high barrier film packaging on chlorophyll a (a), b (b) and total chlorophyll (c) contents of *Brassica campestris* L.

素 b 和总叶绿素含量下降幅度也最大,在贮藏 30 d 时损失率分别为 78.16%,70.00% 和 77.87%;在贮藏的中后期(15~30 d),高阻隔性薄膜 P3 包装的油菜叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量显著高于对照组( $P < 0.05$ ),而 P1 和 P2 组叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量显著高于 P3 组 ( $P < 0.05$ ),但两者之间无明显差异。在 30 d 时,对照组总叶绿素含量为 0.27 mg/g,而 P1、P2 和 P3 组总叶绿素含量分别比对照组高 57.81%,59.70% 和 40.00%。综上,高阻隔性薄膜包装能够减缓叶绿素的下降,P1 和 P2 组对于维持叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的作用更显著,从而减缓叶片黄化进程。

### 2.7 高阻隔性薄膜包装对采后油菜脱植基叶绿素 a 和脱植基叶绿素 b 含量的影响

油菜在贮藏期间,脱植基叶绿素 a 和 b 含量整体呈下降趋势(图 7)。对照组的油菜脱植基叶绿素 a 和 b 含量始终维持在较低的水平,而高阻隔性薄膜包装明显的减缓了脱植基叶绿素 a 和 b 含量的下降,在贮藏的 20~30 d 时显著高于对照组( $P < 0.05$ )。在贮藏第 30 天时,高阻隔性薄膜 P1、P2 和 P3 包装的油菜脱植基叶绿素 a 含量分别比对照组高 0.14,0.18 mg/g 和 0.15 mg/g;脱植基叶绿素 b 含量高 0.38,0.38 mg/g 和 0.36 mg/g。可见,高阻隔性薄膜包装可以显著抑制脱植基叶绿素 a 和脱植基叶绿素 b 的下降。

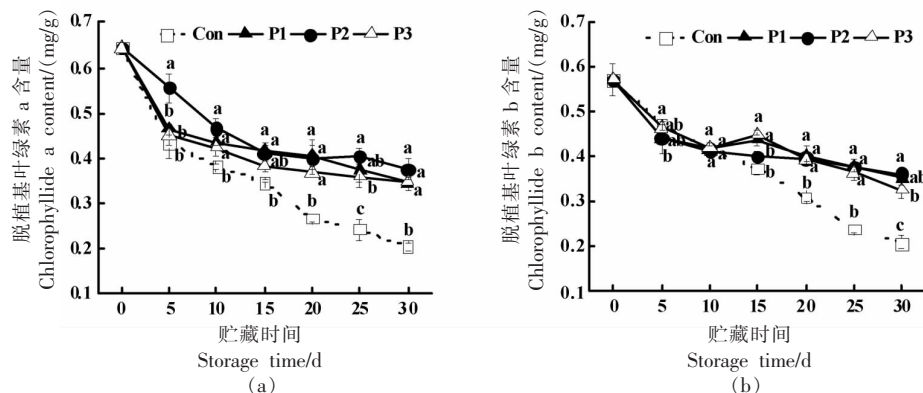


图 7 高阻隔性薄膜包装对采后油菜脱植基叶绿素 a(a)和 b(b)含量的影响

Fig.7 Effects of high barrier film packaging on chlorophyllide a (a) and b (b) contents of *Brassica campestris* L.

### 2.8 高阻隔性薄膜包装对采后油菜脱镁叶绿素 a 和脱镁叶绿酸 a 含量的影响

由图 8 可知,各组处理采后油菜脱镁叶绿素

a 含量呈下降-上升-下降的趋势,脱镁叶绿素 a 在组织中逐渐降解。与对照组相比,P3 组油菜脱镁叶绿素 a 含量略高于对照组,而两者间无明显

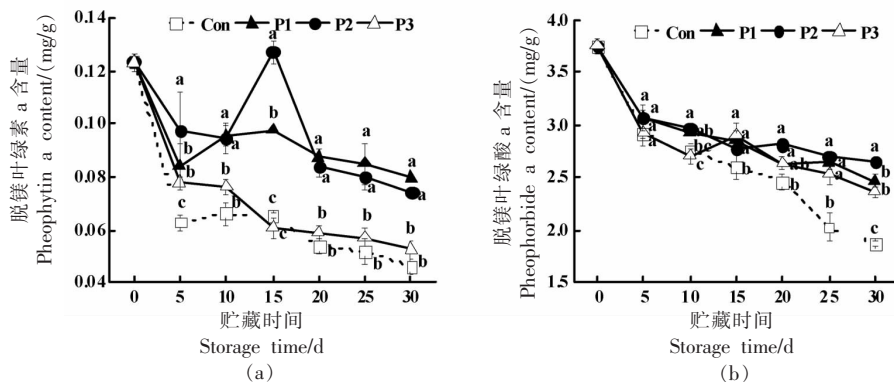


图 8 高阻隔性薄膜包装对采后油菜脱镁叶绿素 a(a)和脱镁叶绿酸 a(b)含量的影响

Fig.8 Effects of high barrier film packaging on pheophytin a (a) and pheophorbide a (b) contents of *Brassica campestris* L.

差异;与对照组和P3组相比,P1和P2组脱镁叶绿素a虽然显著高于对照组和P3组( $P < 0.05$ ),但两者之间在贮藏后期(20~30 d)无明显差异。如在贮藏后期,对照组脱镁叶绿素a含量维持在0.046~0.054 mg/g,而P1和P2组可维持在0.074~0.087 mg/g。对脱镁叶绿酸a来说,在贮藏中后期(15~30 d),高阻隔性薄膜包装可以显著抑制其含量的下降( $P < 0.05$ )。可见,高阻隔性薄膜可以减缓脱镁叶绿素a和脱镁叶绿酸a含量的下降,其中P1和P2薄膜作用效果最显著。

### 3 讨论

包装薄膜的性能直接影响各种包装方式优势的发挥,具有高阻隔性的薄膜可以更有效的阻隔小分子气体 $O_2$ 、 $CO_2$ 和水蒸气等的透过<sup>[27]</sup>。采后油菜在贮藏过程中,营养物质逐渐流失,叶片颜色从暗绿色转变成亮黄色,进而失去商品价值。通过高阻隔性薄膜包装(P1、P2和P3)可以维持袋内低 $O_2$ 和高 $CO_2$ 的环境,抑制叶片 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 值的增加,维持较好的外观色泽,较高的营养成分类胡萝卜素、叶黄素、抗坏血酸和可溶性蛋白,其中,P1和P2薄膜对油菜的品质维持有更显著的作用,这可能由于P1和P2薄膜的厚度大, $O_2$ 和 $CO_2$ 的透过率比P3高,水蒸气透过率比P3低的原因。在空心菜包装方面的研究指出,厚度相对较高, $O_2$ 和 $CO_2$ 渗透系数较低的薄膜可以在包装袋内形成高浓度 $CO_2$ 和低浓度 $O_2$ ,有效延长空心菜货架期,提升其食用品质和商品价值。曹菲等<sup>[28]</sup>的研究显示,薄膜包装配合低温贮藏对降低青菜营养物质的流失和货架期的延长有显著的效果。在高阻隔性薄膜方面的研究指出,高阻隔性薄膜包装对牛肉<sup>[29]</sup>、鲜猪肉<sup>[30]</sup>延缓品质指标的劣变、延长货架期。可见,高阻隔性薄膜包装可以维持油菜较好的外观品质与色泽,维持袋内低 $O_2$ 和高 $CO_2$ 的环境,降低营养物质的损失。

叶片颜色的变化是衡量绿色蔬菜品质变化和衰老的重要指标,而叶绿素的降解会导致采后油菜褪绿转黄,衰老腐烂,进而缩短其贮藏期。叶绿素的代谢途径大部分集中在脱镁叶绿酸a加氧酶(PAO)途径,前期反应降解产物为绿色,主要有脱植基叶绿素,脱镁叶绿素,脱镁叶绿酸等<sup>[31-32]</sup>。本研

究发现,采后油菜的叶绿素代谢衍生物主要有叶绿素a、叶绿素b、脱植基叶绿素a、脱植基叶绿素b、脱镁叶绿素a和脱镁叶绿酸a。经过高阻隔性薄膜包装抑制了油菜叶绿素代谢衍生物的下降,维持较高的叶绿素含量,高阻隔性薄膜P1、P2效果更为显著。类似的研究指出,通过抑制叶绿素代谢衍生物的下降可以减缓青花菜<sup>[33]</sup>、西兰花<sup>[34]</sup>和青菜<sup>[35]</sup>的黄化进程。杜传来等<sup>[36]</sup>的研究结果表明,低温结合适当的包装可以降低绿叶蔬菜中叶绿素的降解,有效地延长其贮藏时间,提高其保鲜效果。由此可见,高阻隔性薄膜可通过延缓叶绿素衍生物的降解速率,维持采后油菜较好的营养品质,其中高阻隔性薄膜P1和P2能较好地维持油菜的色泽并延其低温贮藏期。

### 4 结论

高阻隔性薄膜包装可以减缓油菜的品质劣变进程及叶绿素降解。与高阻隔性薄膜P3相比,P1和P2可以显著抑制油菜 $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ 的升高,减缓类胡萝卜素、叶黄素、VC和可溶性蛋白的损耗,抑制叶绿素衍生物(叶绿素a、叶绿素b、脱植基叶绿素a、脱植基叶绿素b、脱镁叶绿酸a和脱镁叶绿素a)的下降,并能维持袋内低 $O_2$ 高 $CO_2$ 的环境,进而延缓叶片黄化衰老,维持油菜较高的品质,可延长贮藏保鲜期15 d以上。

### 参 考 文 献

- [1] JEON J, LIM C, KIM J, et al. Comparative metabolic profiling of green and purple pakchoi (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*) [J]. *Molecules*, 2018, 23(7): 1613.
- [2] AHIBERG M K. A profound explanation of why eating green (wild) edible plants promote health and longevity[J]. *Food Frontiers*, 2021, 2(3): 240-267.
- [3] 张悦, 李安, 潘立刚, 等. 1-甲基环丙烯结合植酸处理对菠菜保鲜效果的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(1): 231-238.  
ZHANG Y, LI A, PAN L G, et al. Effect of 1-methylcyclopropene combined with phytic acid treatment on fresh-keeping effect of spinach [J]. *Food*



- Science, 2023, 44(1): 231-238.
- [4] 卢瑞雪, 韩延超, 陈杭君, 等. 褪黑素处理对小青菜贮藏品质的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 198-205.  
LU R X, HAN Y C, CHEN H J, et al. Effect of melatonin treatment on storage quality of pakchoi[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 198-205.
- [5] 王宏, 董大远. 清洗剂对生菜贮藏保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(8): 153-156.  
WANG H, DONG D Y. Effects of fresh-keeping agent on the preservation of lettuce[J]. Food Research and Development, 2006, 27(8): 153-156.
- [6] AN R H, LUO S F, ZHOU H S, et al. Effects of hydrogen-rich water combined with vacuum precooling on the senescence and antioxidant capacity of pakchoi (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*)[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 289(17): e110469.
- [7] 高春霞, 乔勇进, 甄凤元, 等. 气调贮藏对小白菜品质及生理生化特性的影响[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(1): 1-5, 73.  
GAO C X, QIAO Y J, ZHEN F Y, et al. Physio-biochemical characteristics and quality of pakchoi during controlled atmosphere storage [J]. Food and Fermentation sciences and Technology, 2017, 53(1): 1-5, 73.
- [8] HAN J J, GOMES-FEITOSA C L, CASTELL-PEREZE E, et al. Quality of packaged romaine lettuce hearts exposed to low-dose electron beam irradiation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(7): 705-715.
- [9] 李文瀚, 刘紫韞, 李喜宏, 等. 不同包装方式对鲜切秦冠苹果贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 97-101.  
LI W H, LIU Z Y, LI X H, et al. Effects of different packaging methods on storage quality of fresh-cut Qingquan apple[J]. Food Research and Development, 2019, 40(15): 97-101.
- [10] 梁惜雯, 顾思彤, 姜爱丽, 等. 自发气调在鲜切果蔬包装中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 8-13.  
LIANG X W, GU S T, JIANG A L, et al. Research progress on the application of modified atmosphere in fresh-cut fruit and vegetable packaging[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 8-13.
- [11] 刘莹, 曹森, 马超, 等. 自发气调包装对采后“十月红”桃质构性能的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 230-234.  
LIU Y, CAO S, MA C, et al. Effect of modified atmosphere packaging on post-harvest texture properties of ‘Shiyuehong’ peaches[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 230-234.
- [12] 岳青青. 阻隔性包装材料的应用现状及发展趋势[J]. 塑料包装, 2011, 21(3): 19-21.  
YUE Q Q. Application status and development trend of barrier packaging materials[J]. Plastics Packaging, 2011, 21(3): 19-21.
- [13] 董文丽. 阻隔性包装材料及生产技术的应用发展[J]. 包装工程, 2009, 30(10): 117-120.  
DONG W L. Application and development of barrier packaging materials and their production technologies [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(10): 117-120.
- [14] 韦友欢, 黄秋婵, 王慧珏, 等. 阴生植物与阳生植物色素含量的比较分析[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(5): 1126-1129.  
WEI Y H, HUANG Q C, WANG H Y, et al. Comparative analysis on pigment content of sun plants and shade plants[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(5): 1126-1129.
- [15] 胡秉芬, 黄华梨, 季元祖, 等. 不同溶剂浸提枣树叶片叶绿素效果的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2017, 281(11): 48-54.  
HU B F, HUANG H L, JI Y Z, et al. Effects of different solutions on chlorophyll extraction from jujube leaves [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2017, 281(11): 48-54.
- [16] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1): 248-254.
- [17] CHEN K, RIOS J J, ROCA M, et al. Development of an accurate and high-throughput methodology for structural comprehension of chlorophylls derivatives (II) dephytylated derivatives [J]. Journal of Chromatography A, 2015, 1412(18): 90-99.
- [18] PUMILIA G, CICHON M J, COOPERSTONE J L, et al. Changes in chlorophylls, chlorophyll degradation products and lutein in pistachio kernels (*Pistacia vera*, L.) during roasting [J]. Food Research International, 2014, 65(pt.b): 193-198.
- [19] SIEVERS G, HYNINEN P H. Thin-layer

- chromatography of chlorophylls and their derivatives on cellulose layers [J]. *Journal of Chromatography*, 1977, 134(2): 359–364.
- [20] MARAIA R, BEATRIZ G R, MA I M M. Varietal differences in catabolic intermediates of chlorophylls in *Olea europaea* (L.) fruit cvs. Arbequina and Blanqueta [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 44(2): 150–156.
- [21] HUANG S C, HUNG C F, WU W B, et al. Determination of chlorophylls and their derivatives in *Gynostemma pentaphyllum* Makino by liquid chromatography–mass spectrometry [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2008, 48(1): 105–112.
- [22] 王春芳, 刘晨霞, 王晓, 等. 不同厚度 LDPE 薄膜袋对鲜切生菜贮藏品质的影响 [J]. *上海农业学报*, 2023, 39(1): 113–118.
- WANG C F, LIU C X, WANG X, et al. Effects of LDPE film bags with different thickness on storage quality of fresh-cut lettuce [J]. *Acta Agricultural Shanghai*, 2023, 39(1): 113–118.
- [23] ZHANG Z Y, NIE M M, XIAO Y R, et al. Positive effects of ultrasound pretreatment on the bioaccessibility and cellular uptake of bioactive compounds from broccoli: Effect on cell wall, cellular matrix and digesta [J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2021, 149: 112052.
- [24] 林永艳, 谢晶, 朱军伟, 等. 清洗方式对鲜切生菜保鲜效果的影响 [J]. *食品与机械*, 2012, 28(1): 211–213.
- LIN Y Y, XIE J, ZHU J W, et al. Effects of different washing agents on the preservation of fresh-cut lettuce [J]. *Food and Machinery*, 2012, 28(1): 211–213.
- [25] 林文芳, 任育军, 缪颖. 植物 Whirly 蛋白调控叶片衰老的研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2014, 50(9): 1274–1284.
- LIN W F, REN Y J, MIAO Y. Research progress of Whirly proteins in regulation of leaf senescence [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(9): 1274–1284.
- [26] LIM P O, KIM H J, NAM H G. Leaf senescence [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58: 115.
- [27] 万重, 朱立民, 刘燕. 新型高阻隔包装材料在乳品包装领域的应用 [J]. *食品研究与开发*, 2009, 30(5): 175–177.
- WAN C, ZHU L M, LIU Y. The application of the new type of barrier milk packaging [J]. *Food Research and Development*, 2009, 30(5): 175–177.
- [28] 曹菲, 张蕾, 田春燕. 贮藏温度及包装薄膜对青菜品质的影响 [J]. *包装工程*, 2004(6): 33–35.
- CAO F, ZHANG L, TIAN C Y. Effect of store temperature and kind of film on quality change of packaged greengrocery [J]. *Packaging Engineering*, 2004(6): 33–35.
- [29] 李升升, 靳义超, 谢鹏. 包装材料阻隔性对牛肉冷藏保鲜效果的影响 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(15): 256–260.
- LI S S, JIN Y C, XIE P. Effect of barrier property of packaging material on the quality of beef during chilling storage [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(15): 256–260.
- [30] 梁晓红, 呼和, 王羽, 等. 高阻隔复合膜对冷鲜肉货架期的影响 [J]. *食品科技*, 2015, 40(5): 150–153.
- LIANG X H, HU H, WANG Y, et al. The impact of high barrier composite film on the shelf life of chilled meat [J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(5): 150–153.
- [31] SHI J Y, GAO L P, ZUO J H, et al. Exogenous sodium nitroprusside treatment of broccoli florets extends shelf life, enhances antioxidant enzyme activity, and inhibits chlorophyll-degradation [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2016, 116: 98–104.
- [32] GUYER L, HOFSTETTER S S, CHRIST B, et al. Different mechanisms are responsible for chlorophyll dephytylation during fruit ripening and leaf senescence in tomato [J]. *Plant Physiology*, 2014, 166(1): 44–56.
- [33] 朱玲玲. 褪黑素处理对鲜切青花菜采后衰老的调控机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- ZHU L L. Study on the regulation mechanism of melatonin treatment on postharvest senescence of fresh-cut broccoli [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [34] 韩颖, 孙莹, 郭峰, 等. 微酸性电解水对采后西兰花叶绿素降解的影响 [J]. *食品科学*, 2023, 44(13): 139–149.
- HAN Y, SUN Y, GUO F, et al. Effect of slightly acidic electrolyzed water on chlorophyll degradation of postharvest broccoli [J]. *Food Science*, 2023, 44(13): 139–149.

- [35] AN R H, LIU X S, LUO S F, et al. Taxifolin delays the degradation of chlorophyll in pakchoi by regulating the ascorbate–glutathione cycle[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 191: 111982.
- [36] 杜传来, 许天亮. 不同贮藏条件和包装方式对几种叶菜保鲜效果的影响[J]. *保鲜与加工*, 2009, 9(2): 30–34.
- DU C L, XU T L. Effects of different storage conditions and packaging model on preservation of several kinds of vegetables [J]. *Storage and Process*, 2009, 9(2): 30–34.

### Effect of High Barrier Film Packaging on Quality and Chlorophyll Degradation of Postharvest *Brassica campestris* L.

AN Ronghui<sup>1</sup>, ZHANG Yuanqi<sup>2</sup>, LI Yan<sup>3</sup>, WEI Wenwen<sup>1</sup>, WANG Da<sup>1</sup>, YANG Xiangzheng<sup>1</sup>, JIA Lianwen<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>Jinan Fruit Research Institute, All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Jinan 250220

<sup>2</sup>Department of Food Science and Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, Zibo 255300, Shandong

<sup>3</sup>Weihai Vocational College, Weihai 264200, Shandong)

**Abstract** The aims of this study was to investigate the impact of high barrier film packaging on quality and chlorophyll degradation of *Brassica campestris* L. *Brassica campestris* L. was packaged using three different high barrier films (P1, P2, and P3) and then stored at (4±1) °C. The changes of phenotype, oxygen and carbon dioxide in the bags, color, nutritional quality and chlorophyll derivatives of *Brassica campestris* L. were analyzed. The results indicated that compared with the control group, the high barrier film packaging could slow down the quality deterioration and chlorophyll degradation of *Brassica campestris* L. The high barrier film P1 and P2 packaging could maintain the low O<sub>2</sub> and high CO<sub>2</sub> environment in the bag, significantly inhibit the increase of L\*, a\* and b\*, and slowed down the decrease of carotenoid, lutein, ascorbic acid and soluble protein contents. The content of chlorophyll derivatives (chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyllide a, chlorophyllide b, pheophorbide a and pheophytin a) was maintained at a high level, the total chlorophyll content was 0.37 mg/g and 0.40 mg/g higher than that of the control group at 30 days of shelf life, respectively. thus delaying leaf yellowing and senescence. In general, high barrier films P1 and P2 could maintain high quality of *Brassica campestris* L., inhibit chlorophyll degradation and prolong the storage life for more than 15 days.

**Keywords** high barrier film; *Brassica campestris* L.; quality; chlorophyll degradation