

光照时间对采后芥蓝芽菜生物活性物质的影响

李煜博, 王梦雨, 陈浩, 夏楚楚, 苗慧莹, 汪俏梅*

(浙江大学农业与生物技术学院 杭州 310058)

摘要 不同光照时间影响采后芥蓝芽菜中生物活性物质的含量。为探究其具体情况,以自然光周期(16 h 光照/ 8 h 黑暗)为对照,同时设置遮光处理组(0 h 光照/ 24 h 黑暗、8 h 光照/ 16 h 黑暗和 12 h 光照/ 12 h 黑暗)和补光处理组(24 h 光照/ 0 h 黑暗),分析采后芥蓝芽菜在室温贮藏过程中芥子油苷、维生素 C、总多酚、叶绿素、类胡萝卜素和总抗氧化能力的变化。结果表明,贮藏 2 d 和 3 d 时,遮光处理组 T1(0 h 光照/ 24 h 黑暗)中总芥子油苷含量分别比对照显著提高了 27.96%, 19.73%;遮光处理组 T2(8 h 光照/ 16 h 黑暗)分别较对照显著提高了 27.70%, 10.88%。此外,遮光处理组有效维持了芥蓝芽菜贮藏过程中叶绿素和类胡萝卜素的含量,而采后光照时间对总多酚含量和抗氧化能力没有产生显著影响。本研究结果从合理设置光照时间的角度出发,为保持芥蓝芽菜的采后品质提供了理论依据,具有一定的应用潜力。

关键词 芥蓝芽菜; 采后光照时间; 芥子油苷; 生物活性物质

文章编号 1009-7848(2023)03-0300-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.03.031

芥蓝 (*Brassica oleracea* var. *alboglabra* Bailey) 是十字花科芸薹属的一年生草本植物,种植历史悠久,是我国的特色蔬菜,在我国福建和两广地区有较为广泛的种植^[1]。近年来,随着我国消费者对蔬菜品质、营养、外观等综合需求的提高,芽菜因营养丰富、口味清新且栽培简单而受到消费者的喜爱,成为我国蔬菜市场上的新秀。研究发现,芥蓝芽菜含有多种生物活性物质,如芥子油苷、维生素 C、多酚类化合物、叶绿素、类胡萝卜素等^[2]。另外,芥蓝芽菜制种简单、种子成本低,因而日渐成为我国市场上消费较多的芽菜。

芥子油苷是芥蓝芽菜中含有的一种生物活性物质。根据其侧链氨基酸种类的不同,可将其分为脂肪族、吲哚族和芳香族 3 类^[3]。其中,4-甲基硫丁基芥子油苷(glucoerucin, GER)、4-甲基硫氧丁基芥子油苷(glucoraphanin, GRA)等脂肪族芥子油苷的降解产物异硫代氰酸盐具有抗炎症和抗癌的活性^[4-6],特别是 GRA 的降解产物萝卜硫素是当前植物研究中发现的抗癌功效最强的天然产物^[7]。

芥蓝芽菜中生物活性物质的含量受到多种外界因素的影响,如温度^[8]、辐射^[9]、光质^[10-11]、光周期^[12]以及采收时间点^[13]等。其中光是一种重要的非生物因素。研究发现,光对植物的生长、发育和形态建成等生理过程均具有重要影响^[14],并且光对植物的影响也延伸到采后。目前,光对采后芽菜中生物活性物质的调控主要集中在有关光质方面的研究中。常嘉琪等^[15]报道采后红光处理延缓了芥蓝芽菜中芥子油苷、维生素 C 含量的下降,促进了花青素、总多酚物质的积累,提高了芽菜的抗氧化能力。冯尚坤等^[16]报道红光处理延缓了萝卜芽菜中芥子油苷含量的下降,提高了叶绿素和花青素的含量,以及贮藏早期的抗氧化能力。Castillejo 等^[17]在青花菜芽菜中发现,远红外 LED 光质增加了下胚轴和芽的长度,减少微生物的生长并提高了抗氧化活性,蓝光 LED 降低芽菜的抗氧化能力。目前,有关光对芽菜生物活性物质的研究主要集中在光质方面,而对采后不同光照时长的报道较少。我国芸薹属芽菜消费市场日渐繁荣,然而其具有光照发芽、幼嫩脆弱、容易失水的特点,如何改进芽菜采后的贮藏技术和方法以维持品质,是目前芽菜产业亟待解决的问题。本研究探究采后芥蓝芽菜贮藏期间,不同光照时长对其芥子油苷、总多酚、维生素 C、叶绿素、类胡萝卜素以及总抗氧化能力的影响,以期为其生物活性物质提供技术参考。

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32172593);国家自然科学基金青年科学基金项目(32202466);浙江省“万人计划”科技创新领军人才项目(2018R52026)

第一作者: 李煜博,女,硕士生

通信作者: 汪俏梅 E-mail: qiaomeiw@zju.edu.cn

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“四季粗条”芥蓝种子,广东佛山计仔公司。

漂白水,日本花王公司;抗坏血酸、草酸、乙醇、甲醇,国药集团化学试剂有限公司;色谱级乙腈、色谱级甲醇,北京索莱宝科技有限公司;DEAE-Sephadex A-25、硫酸酯酶、邻硝基苯基-D-半乳糖苷,Sigma-Aldrich 公司;碳酸钠、没食子酸,上海源叶生物科技有限公司;福林酚试剂,上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 仪器与设备

高效液相色谱仪,日本岛津公司;SPD-M20A 二极管阵列,日本 Shimadzu 公司;Spherisorb C18 色谱柱,赛默飞世尔科技公司;超高速离心机,德国 Eppendorf 公司;紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;冷冻干燥机,北京博励行仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 芽菜种植、处理和取样方法 选取籽粒饱满的芥蓝种子装在 50 mL 离心管中,用 75%酒精清洗 2~3 min,用清水洗 3 次后用 40%漂白水洗 10 min,用清水洗 9~10 次。清洗过程中去掉浮在液面的种子,然后将种子转移到 50 mL 锥形瓶中,在 28 ℃培养箱的黑暗条件下静置 24 h。将浸种完毕的种子均匀播种于育苗盘 (33 cm×26 cm×4.5 cm)中,置于人工气候培养室内培育。芽菜培养条件:光强 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$,温度 22 ℃,光周期为光照 16 h 和黑暗 8 h,湿度约 70%,早、中、晚各喷 1 次水,及时补充水分,夜间盖上盖子保水。芽菜生长 8 d 后,剪去根部,适当喷水后,用 PE 塑料盒 (GWT-1910 185 mm×95 mm×25 mm) 加 3 层 PVC 膜包装,置于不同光照时间条件下(每天 0, 8, 12, 16 h 和 24 h,以 16 h 自然光周期为对照组,0, 8, 12 h 光照为遮光处理组,24 h 光照为补光处理组)处理,设置光强约 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$,分别在贮藏 0, 1, 2 d 和 3 d 取样,保存在-80 ℃,冷冻干燥后研磨成粉末,用于后续各类指标的检测,每个处理和时间点重复 3 次。

1.3.2 芥子油苷组分和含量的测定 芥子油苷的提取与测定参照 Zeng 等^[18]的方法并适当改进。称量粉末,加入 90%甲醇后涡旋混匀,室温静置后高

速离心,取上清液加入 DEAE-Sephadex A-25 柱中,经清洗纯化,加入硫酸酯酶恒温催化过夜,用 ddH₂O 洗脱后过滤,得到芥子油苷提取液样品。采用高效液相色谱法对纯化样品进行分析鉴定。采用 Spherisorb C18 色谱柱 (粒径 5 μm , 4.6 mm×250 mm),柱温 30 ℃,进样量 20 μL ,流动相为乙腈和水,流速 1.0 mL/min。该程序采用梯度洗脱: 0~5 min 1.5%乙腈;5~20 min 1.5%~20%乙腈;20~32 min 20%乙腈。检测波长 226 nm,以邻硝基苯基-D-半乳糖苷为内标计算芥子油苷的含量,数据以 $\mu\text{mol}/\text{g}$ 干质量表示。

1.3.3 维生素 C 含量测定 维生素 C 的提取与测定参考苗慧莹等^[19]的方法并适当改进。称样加入 1%草酸溶液,涡旋混匀后离心,吸取上清液至预冷的离心管中,过滤器过滤后用 HPLC 法分析,整个过程在低温避光条件下。样品中维生素 C 的含量采用抗坏血酸外标法计算。

1.3.4 总多酚含量测定 总多酚的提取与测定参考常嘉琪等^[15]的方法并适当改进。称样加 30%乙醇,80 ℃水浴后离心,吸取上清液加入福林酚试剂,混匀后加入饱和碳酸钠,然后在 760 nm 波长处测其吸光度值,以 30%乙醇为对照。以不同浓度没食子酸为标准计算总多酚含量。

1.3.5 总抗氧化能力测定 参考蔡丛希等^[20]的方法并适当改进。

1.3.6 叶绿素和类胡萝卜素含量测定 参考 Miao 等^[21]的方法并适当改进。称取样品加入 96%乙醇,涡旋混匀后离心,取上清液在波长 665, 649, 470 nm 处测吸光度,以 96%乙醇为对照,分别计算叶绿素和类胡萝卜素的含量。

1.4 统计分析

采用软件 GraphPad Prism 9.0.0 中的双因素方差分析 (two way analysis of variance, ANOVA)和 Tukey 检验对数据进行显著性分析,显著性水平为 $P<0.05$,最终数据表示为平均值±标准误差,采用 GraphPad Prism 9.0.0 进行作图。

2 结果与分析

2.1 芥子油苷组分和含量

由表 1 和图 1 可知,通过高效液相色谱共检测到 11 种芥子油苷,包括 7 种脂肪族芥子油苷,

分别为 3-甲基硫氧丙基芥子油苷、4-甲基硫氧丁基芥子油苷、烯丙基芥子油苷、3-丁烯基芥子油苷、2-羟基-3-丁烯基芥子油苷、4-甲基硫丁基芥子油苷和 2-羟基-4-戊烯基芥子油苷，以及 4 种

吲哚族芥子油苷，分别为吲哚-3-甲基芥子油苷、4-羟基-吲哚-3-甲基芥子油苷、4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷和 1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷。

表 1 芥蓝芽菜中 11 种芥子油苷简要信息

Table 1 Brief information of 11 glucosinolates in Chinese kale sprouts

| 类别 | 化学名称 | 英文名称 | 缩写 |
|---------|-------------------|--------------------------|---------|
| 脂肪族芥子油苷 | 3-甲基硫氧丙基芥子油苷 | glucoiberin | GIB |
| | 4-甲基硫氧丁基芥子油苷 | glucoraphanin | GRA |
| | 烯丙基芥子油苷 | sinigrin | SIN |
| | 3-丁烯基芥子油苷 | gluconapin | GNA |
| | 2-羟基-3-丁烯基芥子油苷 | progoitrin | PRO |
| | 4-甲基硫丁基芥子油苷 | glucoerucin | GER |
| | 2-羟基-4-戊烯基芥子油苷 | gluconapoleiferin | GNL |
| 吲哚族芥子油苷 | 吲哚-3-甲基芥子油苷 | glucobrassicin | GBS |
| | 4-羟基-吲哚-3-甲基芥子油苷 | 4-hydroxy glucobrassicin | 4-OHGBS |
| | 4-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷 | 4-methoxy glucobrassicin | 4-OMGBS |
| | 1-甲氧基-吲哚-3-甲基芥子油苷 | neoglucobrassicin | NGBS |
| | | | |

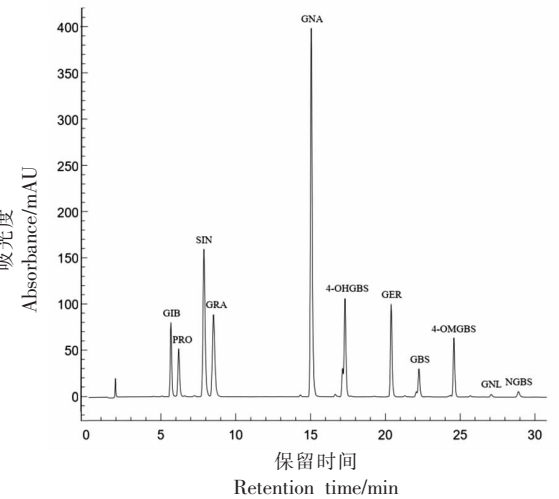


图 1 生长 8 d 芥蓝芽菜中芥子油苷的 HPLC 图

Fig.1 HPLC chromatogram of glucosinolates in 8-day-old Chinese kale sprouts

由表 2 可知,在芥蓝芽菜中,脂肪族芥子油苷的占比较高,为总芥子油苷含量的 94.06%;在脂肪族芥子油苷中,GNA 含量最高,约占总芥子油苷的 42.25%,其次是 SIN(约占总量的 18.21%);在吲哚族芥子油苷中,占比最高的组分为 4-O-HGBS,约占总量的 3.36%。

试验结果表明,随着贮藏时间的延长,遮光处

理组 T1 和 T2 (光周期分别为 0 h 光照/ 24 h 黑暗和 8 h 光照/ 16 h 黑暗)中总芥子油苷含量呈先下降后上升再下降的变化趋势,而遮光处理组 T3、对照组及补光处理组 T4 (光周期分别为 12 h 光照/ 12 h 黑暗、16 h 光照/ 8 h 黑暗和 24 h 光照/ 0 h 黑暗)中总芥子油苷含量逐渐降低。贮藏 2 d 时,遮光处理组中总芥子油苷含量均显著高于对照,分别高出 27.96%,27.70%和 10.94%;而补光处理组中总芥子油苷含量显著低于对照,低了 10.62%。贮藏 3 d 时,遮光处理组 T1 与遮光处理组 T2 中总芥子油苷含量均显著高于对照,分别高出 19.73%和 10.88%,与对照相比,补光处理组中总芥子油苷含量下降情况显著,下降了 25.10%。此外,采后光照时间也改变了芥子油苷种类的比例。就总脂肪族芥子油苷而言,贮藏 2 d 和 3 d 时,遮光处理组均高于对照组,而补光处理组低于对照。贮藏 2 d 和 3 d 时,遮光处理组中 GRA 含量均高于对照,而补光处理组中的 GRA 低于对照(图 2)。

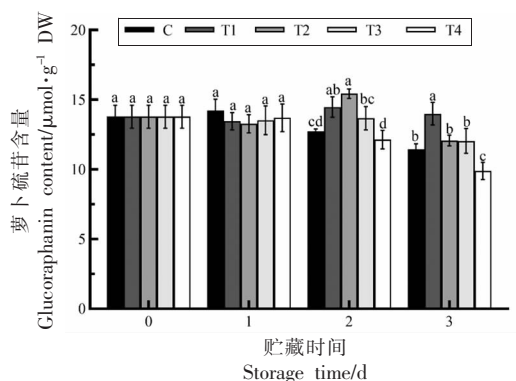
2.2 维生素 C 含量

由图 3 可知,贮藏 1 d 时,遮光处理组中的维生素 C 含量全部高于对照组,其中遮光处理组 T1 中维生素 C 含量显著高于对照,高出 14.97%,补

表 2 采后不同光照时间对芥蓝芽菜中芥子油苷的影响 (22 °C贮藏) ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$)

| Table 2 Effects of different light time on glucosinolates of Chinese kale sprouts after harvested (stored at 22 °C) (μmol·g ⁻¹ DW) | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 芥子油苷含量 | | GIB | PRO | SIN | GRA | GNA | GER | GNL | 总 AGS | 4-OH GBS | GBS | 4-OM GBS | NGBS | 总 ICS | 总 GS |
| 处理前 | | 7.49 ± 0.21 | 5.87 ± 0.10 | 20.21 ± 0.31 | 13.79 ± 0.48 | 46.89 ± 0.75 | 9.79 ± 0.17 | 0.35 ± 0.0089 | 104.39 ± 0.88 | 3.73 ± 0.10 | 1.05 ± 0.014 | 1.59 ± 0.04 | 0.18 ± 0.0051 | 6.54 ± 0.09 | 110.98 ± 0.95 |
| 贮藏 1 d | C | 7.81 ± 0.24 ^a | 5.24 ± 0.10 ^{bc} | 18.50 ± 0.33 ^{ab} | 14.22 ± 0.41 ^a | 42.52 ± 0.67 ^{ab} | 9.08 ± 0.13 ^b | 0.32 ± 0.0036 ^b | 97.70 ± 1.85 ^a | 3.49 ± 0.06 ^a | 0.91 ± 0.027 ^a | 1.64 ± 0.04 ^{ab} | 0.17 ± 0.0011 ^c | 6.30 ± 0.12 ^a | 101.79 ± 0.97 ^{ab} |
| | T1 | 7.46 ± 0.20 ^a | 6.08 ± 0.12 ^a | 18.95 ± 0.38 ^{ab} | 13.46 ± 0.36 ^a | 45.33 ± 0.74 ^a | 8.41 ± 0.13 ^b | 0.35 ± 0.0059 ^a | 99.34 ± 2.15 ^a | 3.36 ± 0.15 ^a | 0.97 ± 0.027 ^a | 1.6 ± 0.05 ^b | 0.21 ± 0.0043 ^{ab} | 6.10 ± 0.15 ^a | 105.67 ± 2.31 ^{ab} |
| | T2 | 7.50 ± 0.19 ^a | 6.15 ± 0.15 ^a | 20.02 ± 0.48 ^a | 13.28 ± 0.33 ^a | 44.61 ± 1.02 ^a | 8.99 ± 0.21 ^b | 0.33 ± 0.0074 ^{ab} | 100.89 ± 2.35 ^a | 3.33 ± 0.06 ^a | 1.02 ± 0.005 ^a | 1.7 ± 0.01 ^{ab} | 0.19 ± 0.0045 ^b | 6.24 ± 0.07 ^a | 104.94 ± 1.21 ^{ab} |
| | T3 | 7.57 ± 0.34 ^a | 5.44 ± 0.14 ^b | 19.89 ± 0.55 ^a | 13.53 ± 0.60 ^a | 44.01 ± 1.08 ^a | 9.91 ± 0.22 ^a | 0.33 ± 0.0104 ^{ab} | 102.57 ± 3.05 ^a | 3.60 ± 0.12 ^a | 1.05 ± 0.031 ^a | 1.81 ± 0.06 ^a | 0.22 ± 0.0056 ^a | 6.52 ± 0.21 ^a | 109.46 ± 3.25 ^a |
| 贮藏 2 d | T4 | 7.61 ± 0.09 ^a | 4.81 ± 0.04 ^c | 18.02 ± 0.17 ^b | 13.70 ± 0.50 ^a | 39.79 ± 0.40 ^b | 8.99 ± 0.15 ^b | 0.33 ± 0.0018 ^b | 92.98 ± 1.08 ^a | 3.48 ± 0.07 ^a | 1.05 ± 0.034 ^a | 1.61 ± 0.02 ^b | 0.16 ± 0.0040 ^c | 6.17 ± 0.16 ^c | 99.15 ± 1.02 ^b |
| | C | 6.87 ± 0.06 ^{bc} | 4.66 ± 0.05 ^c | 15.54 ± 0.15 ^c | 12.75 ± 0.08 ^{cd} | 34.09 ± 0.33 ^c | 8.31 ± 0.10 ^d | 0.29 ± 0.0052 ^c | 82.50 ± 0.77 ^c | 3.24 ± 0.05 ^b | 0.99 ± 0.011 ^b | 1.58 ± 0.02 ^d | 0.18 ± 0.0030 ^{ab} | 5.99 ± 0.08 ^b | 88.49 ± 0.84 ^c |
| | T1 | 8.22 ± 0.20 ^a | 5.99 ± 0.05 ^a | 20.81 ± 0.21 ^a | 14.47 ± 0.36 ^{ab} | 46.35 ± 0.36 ^a | 10.30 ± 0.07 ^a | 0.37 ± 0.0009 ^a | 106.51 ± 1.10 ^a | 3.63 ± 0.03 ^a | 0.74 ± 0.005 ^c | 2.02 ± 0.01 ^b | 0.19 ± 0.0021 ^a | 6.72 ± 0.14 ^a | 113.23 ± 1.16 ^a |
| | T2 | 8.33 ± 0.10 ^a | 5.50 ± 0.05 ^b | 20.37 ± 0.23 ^a | 15.44 ± 0.20 ^a | 47.38 ± 0.58 ^a | 9.73 ± 0.08 ^b | 0.39 ± 0.0031 ^a | 106.26 ± 1.74 ^a | 3.11 ± 0.13 ^b | 1.04 ± 0.022 ^{ab} | 2.18 ± 0.04 ^a | 0.18 ± 0.0019 ^b | 6.50 ± 0.20 ^{ab} | 113 ± 1.94 ^a |
| 贮藏 3 d | T3 | 7.35 ± 0.23 ^b | 5.27 ± 0.08 ^b | 17.58 ± 0.28 ^b | 13.68 ± 0.42 ^{bc} | 38.44 ± 0.50 ^b | 8.68 ± 0.12 ^c | 0.34 ± 0.0039 ^b | 91.36 ± 1.30 ^b | 3.74 ± 0.12 ^a | 1.11 ± 0.023 ^a | 1.83 ± 0.04 ^c | 0.14 ± 0.0016 ^c | 6.82 ± 0.19 ^a | 98.17 ± 1.47 ^b |
| | T4 | 6.41 ± 0.17 ^c | 3.28 ± 0.01 ^d | 13.72 ± 0.08 ^d | 12.15 ± 0.33 ^d | 30.31 ± 0.12 ^d | 7.13 ± 0.03 ^c | 0.28 ± 0.0016 ^c | 73.27 ± 0.64 ^d | 3.62 ± 0.03 ^a | 1.07 ± 0.019 ^{ab} | 1.14 ± 0.02 ^e | 0.11 ± 0.0027 ^d | 5.83 ± 0.15 ^b | 79.10 ± 0.75 ^d |
| | C | 6.25 ± 0.11 ^b | 4.47 ± 0.04 ^c | 15.41 ± 0.15 ^c | 11.45 ± 0.20 ^b | 34.83 ± 0.23 ^b | 7.00 ± 0.12 ^c | 0.30 ± 0.0032 ^b | 79.72 ± 0.81 ^b | 3.81 ± 0.09 ^a | 1.28 ± 0.034 ^a | 1.60 ± 0.03 ^c | 0.17 ± 0.0009 ^d | 6.86 ± 0.14 ^b | 86.58 ± 0.94 ^c |
| | T1 | 7.77 ± 0.26 ^c | 5.44 ± 0.12 ^a | 18.06 ± 0.42 ^a | 13.99 ± 0.47 ^a | 41.08 ± 0.80 ^a | 8.88 ± 0.18 ^a | 0.36 ± 0.0082 ^a | 94.68 ± 2.50 ^a | 3.86 ± 0.08 ^a | 0.74 ± 0.032 ^c | 1.72 ± 0.03 ^{bc} | 0.20 ± 0.0051 ^c | 6.56 ± 0.12 ^b | 103.66 ± 0.87 ^a |
| 贮藏 3 d | T2 | 6.35 ± 0.08 ^b | 4.89 ± 0.01 ^b | 17.22 ± 0.06 ^{ab} | 12.08 ± 0.19 ^b | 41.32 ± 0.26 ^a | 8.49 ± 0.07 ^a | 0.30 ± 0.0067 ^b | 90.65 ± 0.29 ^a | 2.55 ± 0.09 ^c | 0.83 ± 0.016 ^c | 1.74 ± 0.03 ^b | 0.22 ± 0.0041 ^b | 5.35 ± 0.14 ^c | 96.00 ± 0.21 ^b |
| | T3 | 6.48 ± 0.23 ^b | 4.85 ± 0.08 ^b | 16.52 ± 0.25 ^b | 12.05 ± 0.45 ^b | 35.47 ± 0.48 ^b | 6.24 ± 0.08 ^b | 0.29 ± 0.0037 ^b | 81.90 ± 1.52 ^b | 3.85 ± 0.10 ^a | 1.30 ± 0.029 ^a | 2.47 ± 0.05 ^a | 0.26 ± 0.0042 ^a | 7.91 ± 0.18 ^a | 89.61 ± 1.73 ^c |
| | T4 | 4.97 ± 0.15 ^c | 3.62 ± 0.02 ^d | 11.03 ± 0.07 ^d | 9.89 ± 0.31 ^c | 23.70 ± 0.15 ^c | 5.49 ± 0.04 ^d | 0.23 ± 0.0025 ^c | 58.93 ± 0.47 ^c | 3.33 ± 0.04 ^b | 1.08 ± 0.006 ^b | 1.41 ± 0.01 ^d | 0.11 ± 0.0020 ^c | 5.93 ± 0.05 ^c | 64.86 ± 0.48 ^d |

注:表中数据为 3 次重复平均值。相同贮藏时间下同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。C. 对照, 16 h 光照/8 h 黑暗; T1. 处理 1.0 h 光照/24 h 黑暗; T2. 处理 2.8 h 光照/16 h 黑暗; T3. 处理 3, 12 h 光照/12 h 黑暗; T4. 处理 4.24 h 光照/0 h 黑暗。下同。



注:图中数据为3次重复平均值。相同贮藏时间下不同字母表示不同处理组间差异显著($P<0.05$)。下同。

图2 采后不同光照时间对芥蓝芽菜中萝卜硫苷的影响(22 °C贮藏)

Fig.2 Effects of different light time on glucoraphanin of Chinese kale sprouts after harvested (stored at 22 °C)

光处理组中维生素C含量低于对照。贮藏2 d时,补光处理组维生素C含量显著低于对照组和遮光处理组。

2.3 叶绿素和类胡萝卜素含量

由图4可知,贮藏1 d时,遮光处理组T1中叶绿素含量与对照相比显著增加了20.78%。贮藏2 d时,遮光处理组中叶绿素含量均高于对照,而补光处理组低于对照。贮藏3 d时,补光处理组中

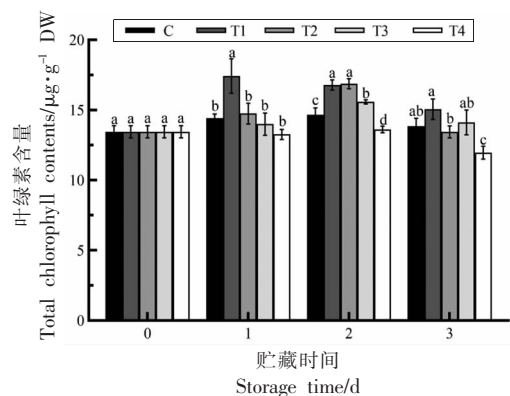


图4 采后不同光照时间对芥蓝芽菜叶绿素的影响(22 °C贮藏)

Fig.4 Effects of different light time on total chlorophyll contents of Chinese kale sprouts after harvest (stored at 22 °C)

2.4 总多酚含量

由图6可知,遮光处理组和补光处理组中总多酚含量与对照相比没有显著性差异。

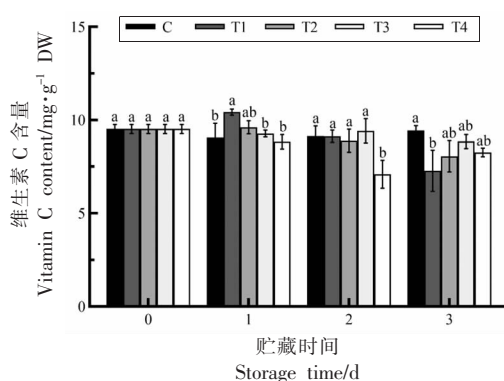


图3 采后不同光照时间对芥蓝芽菜中维生素C的影响(22 °C贮藏)

Fig.3 Effects of different light time on vitamin C of Chinese kale sprouts after harvested (stored at 22 °C)

的叶绿素含量显著低于对照,低13.63%。

如图5所示,贮藏1 d时,遮光处理组T1中类胡萝卜素含量显著高于对照,补光处理组中类胡萝卜素含量显著低于对照。贮藏2 d时,遮光处理组的类胡萝卜素含量均高于对照,且遮光处理组T1和T2中类胡萝卜素含量显著高于对照,分别高出19.48%和14.92%。

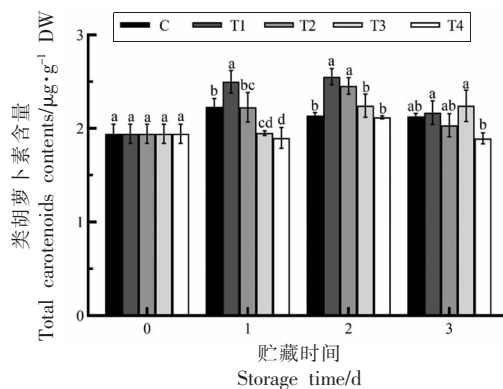


图5 采后不同光照时间对芥蓝芽菜中类胡萝卜素含量的影响(22 °C贮藏)

Fig.5 Effects of different light time on total carotenoids contents of Chinese kale sprouts after harvested (stored at 22 °C)

2.5 抗氧化能力

如图7所示,随着贮藏时间的延长,各组抗氧化能力基本维持稳定。贮藏2 d时,与对照相比,

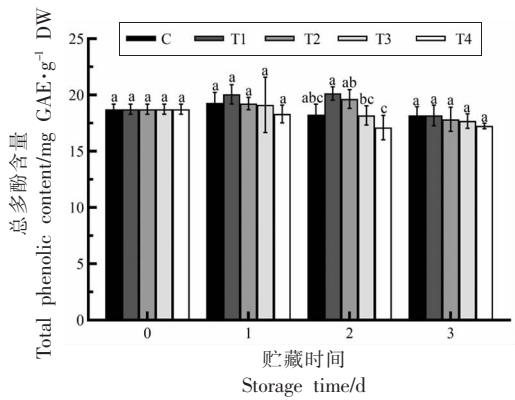


图 6 采后不同光照时间对芥蓝芽菜总多酚含量的影响(22 °C贮藏)

Fig.6 Effects of different light time on total phenolic contents of Chinese kale sprouts after harvested (stored at 22 °C)

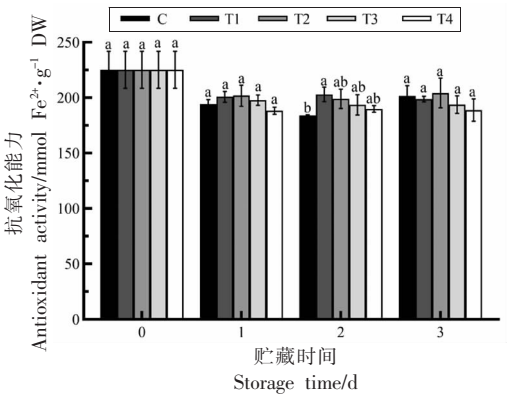


图 7 采后不同光照时间对芥蓝芽菜抗氧化能力的影响(22 °C贮藏)

Fig.7 Effects of different light time on antioxidant activity of Chinese kale sprouts after harvested (stored at 22 °C)

遮光处理组 T1 的抗氧化能力显著提高了 10.33%。

3 讨论

在芥蓝芽菜中共检测到 11 种芥子油苷,其中脂肪族芥子油苷 7 种,吲哚族芥子油苷 4 种,且 GNA 为各组分中含量最多的芥子油苷,这与前人^[15,22-23]的研究结果一致。贮藏 2 d 和 3 d 时,总芥子油苷含量与对照相比,遮光处理组更能维持其在芥蓝芽菜中的含量,而补光处理组不能维持。其中,与抗癌活性相关的 GRA 含量也符合上述规律。维生素 C 含量在贮藏前期可在遮光处理下保持。贮藏过程中,3 个遮光处理组都有利于维持叶绿素含量,且遮光处理组 T1 能显著提高叶绿素的含量,而补光处理组的效果不佳,表明遮光处理即缩短光照时间能够维持较好的外观品质。遮光处理组在整个贮藏过程中起到维持类胡萝卜素含量的作用,遮光处理组 T1 和 T2 能提高其贮藏前期的含量。然而,总多酚含量和抗氧化能力在采后不同光照时间下趋于一致。结果表明,采后不同光照时间影响芥蓝芽菜中芥子油苷、维生素 C、叶绿素和类胡萝卜素等生物活性物质的含量保持,而对总多酚含量和抗氧化能力的影响不大。

光作为调控植物各阶段生长发育过程的信号分子,是植物整个生命周期中的主导因素^[24]。前人研究发现采后不同光处理影响芸薹属蔬菜中生物活性物质的含量,如光强^[25]、光质^[26]和光周期^[27]。本

研究发现,采后遮光处理能够维持芥蓝芽菜中芥子油苷的含量,而补光导致芥子油苷含量的下降,这与前人报道有一定差异。采后 3 d 时,持续光照和每天 12 h 光照处理羽衣甘蓝,其中的芥子油苷含量要高于持续黑暗处理^[27]。采后 0~2 d 将青花菜小花分别贮藏在荧光灯条件(12 h/d)与持续黑暗条件下,其中的萝卜硫苷含量没有明显差异^[10]。与持续黑暗相比,采后贮藏期间的光照处理能够显著延长芥菜侧芽的货架期,提高类胡萝卜素和叶绿素的含量,并且能够延缓芥子油苷含量的下降^[28]。其原因可能是植物种类、生长时期以及表面积不同,羽衣甘蓝叶片、青花菜小花以及芥菜侧芽的体积较大,表皮较厚,不容易受到光损伤。本试验材料为芥蓝芽菜,组织完整性容易受损。考虑到组织特性的不同,光照时间对采后芽菜贮藏的影响不可直接照搬用于成熟蔬菜的贮藏研究。关于芽菜采后贮藏需进一步深入研究。

除芥子油苷外,维生素 C、多酚、叶绿素和类胡萝卜素等也是植物中有益于人体身体健康的重要生物活性物质。本研究发现,随着贮藏时间的延长,适宜的光照时间有利于提高芥蓝芽菜中维生素 C 的含量。贮藏第 3 天时,对照组即 16 h 光照时间下维生素 C 含量最高,而每天 0 h 光照时间含量最低,这一结果与 Xiao 等^[29]在萝卜芽菜中的研究结果一致,可能是因为光照可以提高采后芽菜贮藏期间光合作用的能力,促进维生素 C 的前

体物质 *D*-葡萄糖的合成,进而提高了维生素 C 的含量。本研究中,总多酚含量基本不受采后不同光照时间的影响,这与前人^[17,25,29]的研究结果一致。与光质对总多酚含量的影响不同,不同光照时间对苯丙氨酸解氨酶和其它与酚类物质产生和积累有关的关键酶没有产生显著影响,因此不影响采后植物中的总多酚含量。对于发展中国家来说,冷链运输技术还不够普及,蔬菜的冷链运输体系有待建成与完善。采后芥蓝芽菜等芽菜产品在常温运输或贮藏过程中,其营养物质以及生物活性物质损失较为严重。通过合适的光照时间,适当的遮光处理,可维持采后芽菜的外观品质和营养品质,是冷链系统建设过渡时期的一种经济实惠的解决策略。

4 结论

采后遮光处理可有效维持芥蓝芽菜中总芥子油苷和关键芥子油苷组分的含量,同时对芽菜中类胡萝卜素和叶绿素等色素物质起到维持作用,有利于呈现较好的外观品质。与化学调控和不同光质处理相比,采后遮光处理,不仅简便易行,经济环保,有效缩减贮藏成本,而且效果显著,因此在芥蓝芽菜以及其它幼嫩脆弱芽菜的采后品质维持方面具有实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 孙勃, 方莉, 刘娜, 等. 芥蓝不同器官主要营养成分分析[J]. 园艺学报, 2011, 38(3): 541-548.
SUN B, FANG L, LIU N, et al. Studies on main nutritional components of Chinese kale among different organs [J]. Yuanyi Xuebao (Acta Horticulturae Sinica), 38(3): 541-548.
- [2] DENG M D, QIAN H M, CHEN L L, et al. Influence of pre-harvest red light irradiation on main phytochemicals and antioxidant activity of Chinese kale sprouts[J]. Food Chemistry, 2017, 222: 1-5.
- [3] SØNDERBY I E, GEU-FLORES F, HALKIER B A. Biosynthesis of glucosinolates—gene discovery and beyond[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(5): 283-290.
- [4] SOUNDARARAJAN P, KIM J S. Anti-carcinogenic glucosinolates in cruciferous vegetables and their antagonistic effects on prevention of cancers [J]. Molecules, 2018, 23(11): 2983.
- [5] STURM C, WAGNER A E. Brassica-derived plant bioactives as modulators of chemopreventive and inflammatory signaling pathways[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(9): 1890.
- [6] ARUMUGAM A, ABDULL RAZIS A F. Apoptosis as a mechanism of the cancer chemopreventive activity of glucosinolates: a review[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2018, 19(6): 1439-1448.
- [7] 郭楠. 西兰花副产物中萝卜硫素提取及其对癌症转移的影响[D]. 太原: 山西大学, 2019.
GUO N. Extraction of sulforaphane from broccoli by-products and its effect on cancer metastasis[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
- [8] LI R, ZHU Y. The primary active components, antioxidant properties, and differential metabolite profiles of radish sprouts (*Raphanus sativus* L.) upon domestic storage: analysis of nutritional quality [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(15): 5853-5860.
- [9] BANERJEE A, VARIYAR P S, CHATTERJEE S, et al. Effect of post harvest radiation processing and storage on the volatile oil composition and glucosinolate profile of cabbage[J]. Food Chemistry, 2014, 151: 22-30.
- [10] JIN P, YAO D, XU F, et al. Effect of light on quality and bioactive compounds in postharvest broccoli florets[J]. Food Chemistry, 2015, 172(Apr. 1): 705-709.
- [11] QIAN H M, LIU T Y, DENG M D, et al. Effects of light quality on main health-promoting compounds and antioxidant capacity of Chinese kale sprouts[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 1232-1238.
- [12] CHEN J X, CHEN Z Y, LI Z W, et al. Effect of photoperiod on Chinese kale (*Brassica alboglabra*) sprouts under white or combined red and blue light [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 11: 589746.
- [13] CASAJÚS V, DEMKURA P, CIVELLO P, et al. Harvesting at different time-points of day affects glucosinolate metabolism during postharvest storage of broccoli[J]. Food Research International, 2020, 136: 109529.1-109529.10.
- [14] DE WIT M, GALVÃO V C, FANKHAUSER C.

- Light-mediated hormonal regulation of plant growth and development[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2016, 67: 513-537.
- [15] 常嘉琪, 王梦雨, 邓茗丹, 等. 采后红光处理对芥蓝芽菜生物活性物质的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(2): 481-489.
- CHANG J Q, WANG M Y, DENG M D, et al. Effect of postharvest red light treatment on bioactive compounds in Chinese kale sprouts[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(2): 481-489.
- [16] 冯尚坤, 陈浩, 邵志勇, 等. 红光处理对萝卜芽菜采后贮藏过程中芥子油苷和抗氧化能力的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(6): 1340-1346.
- FENG S K, CHEN H, SHAO Z Y, et al. Effect of red light treatment on glucosinolates and antioxidant capacity in radish sprouts during post-harvest storage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(6): 1340-1346.
- [17] CASTILLEJO N, MARTÍNEZ-ZAMORA L, GÓMEZ P A, et al. Postharvest LED lighting: effect of red, blue and far red on quality of minimally processed broccoli sprouts[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(1): 44-53.
- [18] ZENG W, TAO H, LI Y B, et al. The flavor of Chinese kale sprouts is affected by genotypic variation of glucosinolates and their breakdown products[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129824.
- [19] 苗慧莹, 陈浩, 常嘉琪, 等. 葡萄糖和茉莉酸甲酯对芥蓝芽菜芥子油苷积累及其抗氧化特性的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 44(3): 327-334.
- MIAO H Y, CHEN H, CHANG J Q, et al. Effects of glucose and methyl jasmonate treatments on glucosinolate accumulation and antioxidant attributes in Chinese kale sprouts[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2018, 44(3): 327-334.
- [20] 蔡丛希, 侯秋梅, 汪炳良, 等. 油菜素甾醇对萝卜芽菜生物活性物质的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(7): 1419-1425.
- CAI C X, HOU Q M, WANG B L, et al. Effect of brassinosteroids on bioactive compounds in radish sprouts[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(7): 1419-1425.
- [21] MIAO H Y, ZENG W, ZHAO M, et al. Effect of melatonin treatment on visual quality and health-promoting properties of broccoli florets under room temperature[J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 126498.
- [22] WANG M Y, CAI C X, LIN J Y, et al. Combined treatment of epi-brassinolide and NaCl enhances the main phytochemicals in Chinese kale sprouts[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126275.
- [23] MIAO H Y, WANG M Y, CHANG J Q, et al. Effects of glucose and gibberellic acid on glucosinolate content and antioxidant properties of Chinese kale sprouts[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2017, 18(12): 1093-1100.
- [24] 廖祥儒, 张蕾, 徐景智, 等. 光在植物生长发育中的作用[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2001, 21(3): 341-346.
- LIAO X R, ZHANG L, XU J Z, et al. Role of light in plant development[J]. *Journal of Hebei University (Nature Science Edition)*, 2001, 21(3): 341-346.
- [25] BÜCHERT A M, GÓMEZ LOBATO M E, VILLARREAL N M, et al. Effect of visible light treatments on postharvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.)[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(2): 355-361.
- [26] HARBAUM-PIAYDA B, PALANI K, SCHWARZ K. Influence of postharvest UV-B treatment and fermentation on secondary plant compounds in white cabbage leaves[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 47-56.
- [27] LIU J D, GOODSPEED D, SHENG Z J, et al. Keeping the rhythm: light/dark cycles during postharvest storage preserve the tissue integrity and nutritional content of leafy plants[J]. *BMC Plant Biology*, 2015, 15(1): 92.
- [28] SUN B, DI H M, ZHANG J Q, et al. Effect of light on sensory quality, health-promoting phytochemicals and antioxidant capacity in post-harvest baby mustard[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 128057.1-128057.9.
- [29] XIAO Z L, LESTER G E, LUO Y G, et al. Effect of light exposure on sensorial quality, concentrations of bioactive compounds and antioxidant capacity of radish microgreens during low temperature storage[J]. *Food Chemistry*, 2014, 151: 472-479.

Effect of Postharvest Illumination Time on Bioactive Compounds in Chinese Kale Sprouts

Li Yubo, Wang Mengyu, Chen Hao, Xia Chuchu, Miao Huiying, Wang Qiaomei*

(College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

Abstract Different lighting time affects the content of bioactive substances in postharvest kale sprouts. The contents of glucosinolates, vitamin C, total polyphenols, chlorophyll, carotenoids, and total antioxidant capacity in Chinese kale sprouts were analyzed during postharvest storage at room temperature after different treatments including shading treatment group (0 h light / 24 h darkness, 8 h light / 16 h darkness and 12 h light / 12 h darkness) and supplementary light treatment group (24 h light / 0 h darkness), and the natural photoperiod (16 h light / 8 h darkness) was used as control. The results showed that total glucosinolates content in shading treatment T1 (0 h light / 24 h dark) increased significantly by 27.96% and 19.73% respectively when stored for 2 d and 3 d compared with the control, and the shading treatment T2 (8 h light / 16 h dark) increased remarkably by 27.70% and 10.88%, respectively. In addition, shading treatment effectively maintained the contents of chlorophyll and carotenoids in Chinese kale sprouts during storage. The postharvest light time had no significant effect on the total polyphenol content and antioxidant capacity. The research results provide a theoretical basis for setting the light time reasonably to postpone the decrease of Chinese kale sprouts after harvest, which is potential in maintaining the quality of Chinese kale sprouts during the postharvest period.

Keywords Chinese kale sprouts; postharvest illumination time; glucosinolates; bioactive compounds