

LED蓝白复合光对杏鲍菇采后褐变的影响

杨何^{1,2}, 亢瑞琪¹, 郭峰¹, 罗淑芬², 李鹏霞², 李国锋^{2*}, 纪淑娟^{1*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866) (2. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 为探究发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 光照处理对采后杏鲍菇货架品质的影响。该实验以黑暗处理为对照组 1, 超市货架照明为对照组 2 [28 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$], 超市自然照明为对照组 3 [4.3 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$], 在低温货架条件 (12~15 $^{\circ}\text{C}$) 下, 采用不同光质和光密度的 LED 光对杏鲍菇进行处理, 通过表型分析筛选出适宜其贮藏的光照条件为蓝光: 绿光: 红光 = 8.4:2.3:1.3。以该光质配比为处理组, 同时做上述三组对照, 加做单独蓝光 [8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] 阳性对照组, 研究 LED 蓝白复合光对杏鲍菇采后褐变进程的影响。结果表明: 与对照组相比, LED 蓝白复合光提高了杏鲍菇超氧化物歧化酶、过氧化氢酶等抗氧化酶的活性和 DPPH 自由基清除能力, 降低了其超氧阴离子自由基的产生速率和过氧化氢含量, 保护机体免受活性氧损伤, 抑制了相对电导率和丙二醛含量的上升, 降低了其多酚氧化酶活性, 保持了较高的总酚含量, 由此延缓杏鲍菇的褐变进程; 在第 2~8 天时, LED 蓝白复合光处理组褐变度较对照组 1、2、3 分别降低了 2.24~5.00、1.59~3.23、0.90~1.77 倍。在此基础上, 采用主成分分析和相关性分析进行综合评价, 结果得出, LED 蓝白复合光 (蓝光: 绿光: 红光 = 8.4:2.3:1.3) 处理可有效延缓杏鲍菇的采后褐变进程, 保持其较好的品质。综上, LED 蓝白复合光可有效保持杏鲍菇的外观品质, 延缓其衰老, 为 LED 光照应用在食用菌保鲜方面提供了理论及技术支持。

关键词: 杏鲍菇; LED 光照; 采后品质; 抗氧化; 褐变

文章编号: 1673-9078(2025)10-220-230

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0976

Effect of LED-derived Blue-white Composite Light on Postharvest Browning of *Pleurotus eryngii*

YANG He^{1,2}, KANG Ruiqi¹, GUO Feng¹, LUO Shufen², LI Pengxia², LI Guofeng^{2*}, JI Shujuan^{1*}

(1. School of Food Science, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China) (2. Institute of Facilities and Equipment in Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Individual fruiting bodies of *Pleurotus eryngii* were treated with LED irradiation of different wavelengths and flux densities of light at low temperatures (12~15 $^{\circ}\text{C}$) to investigate the effect of irradiation with blue-white light derived from light emitting diodes (LED) on the shelf-life of *P. eryngii*. Treatment without LED irradiation, or with the lighting conditions typical of supermarket shelves [28 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$], or with supermarket lighting [4.3 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$], were used as controls 1, 2, and 3, respectively. Analyses of the appearance of *P. eryngii* exposed to irradiation with LED blue-white composite light (blue light:green light:red light=8.4:2.3:1.3) demonstrated that treatment with LED light was suitable for storing *P. eryngii*. Thereafter, the effect of LED blue-white composite light on postharvest browning of *P. eryngii* was investigated by selecting the light quality ratio above as the treatment group. The

引文格式:

杨何, 亢瑞琪, 郭峰, 等. LED 蓝白复合光对杏鲍菇采后褐变的影响[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 220-230.

YANG He, KANG Ruiqi, GUO Feng, et al. Effect of LED-derived blue-white composite light on postharvest browning of *Pleurotus eryngii* [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 220-230.

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-10-24; 接受日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31901755)

作者简介: 杨何 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬保鲜与加工, E-mail: 822825237@qq.com

通讯作者: 李国锋 (1972-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬保鲜与加工, E-mail: ligf@jaas.ac.cn; 共同通讯作者: 纪淑娟 (1960-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬采后生物学与贮运保鲜, E-mail: jsjsyau@yeah.net

control groups were set as described above, and a blue light [$8\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] positive control group was added. Compared with the control groups, exposure to LED blue-white composite light increased the activity of antioxidant enzymes (e.g., superoxide dismutase and catalase) and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) free radical scavenging ability of *P. eryngii*. Furthermore, the treatment reduced the production rate of superoxide anion radicals and hydrogen peroxide content, thereby protecting *P. eryngii* cells from damage caused by the accumulation of reactive oxygen species. It also inhibited the increase in relative conductivity and malondialdehyde content. Additionally, composite LED irradiation reduced the activity of polyphenol oxidase, maintained a high total phenol content, and hence delayed the browning of *P. eryngii*. During days 2~8, the degree of browning of the group irradiated with blue-white composite light was 2.24~5.00, 1.59~3.23, and 0.90~1.77 times lower than those of controls 1, 2, and 3, respectively. Principal component analysis and correlation analysis revealed that blue-white composite LED irradiation (blue:green:red light=8.4:2.3:1.3) effectively delayed postharvest browning and preserved the overall quality of *P. eryngii*. These findings provide theoretical and technical foundation for the application of LED irradiation in the postharvest preservation of edible fungi.

Key words: *Pleurotus eryngii*; light-emitting diode (LED) irradiation; postharvest quality; antioxidant; browning

杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*) 又名刺芹侧耳, 富含各种营养成分, 能够提高肌体免疫功能, 还具有降血压血脂, 抗氧化、抗肿瘤等生理功效^[1,2]。杏鲍菇贮藏过程中仍进行呼吸和代谢活动, 氧化生成的有害自由基会加速其成熟。此外, 杏鲍菇水分含量高, 易出现失水萎蔫、褐变、失重、腐烂等品质劣变的现象, 影响杏鲍菇的色泽和风味。

目前, 有关杏鲍菇采后保鲜方面的研究, 主要是低温保鲜、涂膜保鲜、气调保鲜或利用化学药剂 SO_2 等抑菌剂进行保鲜。Nie 等^[3]发现生物防治剂 (*Pichia kluyveri*) 和短波紫外线 (Ultraviolet-C, UV-C) 结合处理促进了杏鲍菇中过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 和超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 的抗氧化酶活性以及总酚和类黄酮等抗菌物质的积累, 有效抑制了杏鲍菇的采后腐烂。Du 等^[4]研究发现, 高氧 ($80\%\ \text{O}_2+20\%\ \text{N}_2$) 处理可通过调节活性氧 (Reactive Oxygen Species, ROS) 代谢修饰酶活性以及苯丙烷途径相关基因的表达, 延缓杏鲍菇采后品质劣变。Ma 等^[5]研究发现, 低密度聚乙烯气调包装通过维持细胞膜的完整性和调节膜脂代谢、能量代谢和呼吸代谢的相关基因表达来减少杏鲍菇的营养物质下降, 并通过激活谷胱甘肽合成代谢相关基因的表达来增强菇体的抗氧化能力, 减少活性氧 ROS 积累, 延缓杏鲍菇的采后褐变。

发光二极管 (Light-emitting Diodes, LED) 是一种节能高效的新型物理保鲜技术, 其采用的冷光源, 可以有效降低因光照产生的温度对果蔬的影响^[6]。目前, LED 光照保鲜技术已经在多种果蔬中得到应用。例如, 孔得慧等^[7]通过对鲜切番茄进行不同的光处理发现, 发现蓝光处理能有效维持番茄原有的营养价值。刘帮迪等^[8]使用 6 种不同波段的 LED 光色处理香蕉, 发现

640~700 nm 红光和 605~640 nm 橙光照射可促进香蕉后熟、440~550 nm 蓝光和 400~440 nm 紫光照射会延缓后熟, 而 565~605 nm 蓝光和 505~565 nm 绿光照射会扰乱香蕉后熟。李洋等^[9]发现蓝光处理可有效减少蓝莓果实的褐变度, 保持其采后营养品质。在红光照下, 西兰花中的抗氧化酶活性和自由基清除能力明显增加, 抑制了活性氧的生成, 进而改善了西兰花的质量^[10]。也有研究发现 LED 红光能有效地抑制衰老调控基因的表达, 尤其是参与乙烯信号传导的基因, 从而延长小白菜的贮藏期^[11]。朱凯^[6]研究发现, LED 蓝光结合 UV-C 处理可增强抗氧化酶和次生代谢相关酶性, 从而保持鲜切杏鲍菇的贮藏品质。此外, LED 光照处理还应用于降低果蔬的褐变、失重率和微生物繁殖等^[12]方面。

本研究以杏鲍菇为试材, 首先采用不同光质和光密度配比的光照条件对杏鲍菇进行处理, 以杏鲍菇表型为依据筛选出适宜其贮藏的光质配比条件; 在此基础上, 以该光质配比对杏鲍菇进行处理, 通过分析其组织色差、褐变度、总酚含量、多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性、抗氧化酶活性、过氧化氢含量、超氧阴离子生成速率、DPPH 自由基清除能力、相对电导率、丙二醛含量等指标的变化, 研究 LED 光照处理对杏鲍菇采后褐变进程的影响, 为杏鲍菇采后保鲜提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本实验采用徐州鑫丰农业科技有限公司生产的杏鲍菇, 采收后立即运回江苏省农业科学院装备所处理室。

无水乙醇、盐酸、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、磷酸二氢钾、氢氧化钾、对氨基苯磺酸, 国药集团化学试剂有限公司; 邻苯二酚、福林酚、饱和碳酸钠、DPPH、盐酸羟胺、对氨基苯磺酸、乙酸, 上海源叶生物科技有限公司; L-甲硫氨酸、氯化硝基四氮唑蓝、核黄素、丙酮, 上海麦克林生化科技有限公司; 过氧化氢 (Hydrogen Peroxide, H₂O₂) 含量检测试剂盒, 江苏晶美生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

PL202-L 电子天平、Seven Multi pH 计, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; UV-1102 型紫外可见分光光度计, 上海天美科学仪器有限公司; 雪花制冰机 FM40, 东莞科美斯科技实业有限公司; 3K15 高速冷冻离心机, 德国 Sigma 公司; HH-S 系列数显恒温水浴锅, 常州万达升实验仪器有限公司; CR-400 全自动测色色差仪, 日本 Konica Minolta 公司。

1.3 处理方法

表 1 LED不同光质和光密度处理条件
Table 1 Different conditions of LED light qualities and densities [μmol/(m²·s)]

处理	蓝光 (450~470 nm)	绿光 (500~530 nm)	红光 (630~660 nm)
CK1 (黑暗)	0	0	0
CK2 (货架照明)	3.5	15.5	9.0
CK3 (自然照明)	0.5	2.6	1.2
T1 (单独蓝光)	8.0	0	0
T2 (蓝光: 白光 =4:1)	4.1	0.6	0.3
T3 (蓝光: 白光 =4:4)	4.4	2.3	1.3
T4 (蓝光: 白光 =4:8)	4.8	4.7	2.5
T5 (蓝光: 白光 =8:1)	8.1	0.6	0.3
T6 (蓝光: 白光 =8:4)	8.4	2.3	1.3
T7 (蓝光: 白光 =8:8)	8.8	4.7	2.5
T8 (蓝光: 白光 =12:1)	12.1	0.6	0.3
T9 (蓝光: 白光 =12:4)	12.4	2.3	1.3
T10 (蓝光: 白光 =12:8)	12.8	4.7	2.5

以避光处理(完全处于黑暗条件)为对照组 1, 超市货架照明为对照组 2, 超市自然照明为对照组 3,

采用不同光质和光密度配比的光照条件对杏鲍菇进行处理, 具体实验组条件见表 1。实验采用的光源为 LED 灯板, 发光点均匀分布于 LED 灯板上, 每个发光点由不同光质(红、绿、蓝)的灯珠组合而成。挑选大小和色泽基本一致且无病害及褐变现象的杏鲍菇作为实验材料, 然后随机分成 13 组, 每 24 个为一组, 每组 3 个平行, 每个平行 8 个杏鲍菇, 置于灯板下进行光照处理, 样品与灯板的间距为 15 cm, 于超市货架条件下(所有处理均控制在 12~15 ℃)进行贮存, 以明期 12 h, 暗期 12 h 对杏鲍菇进行光照处理, 每天在光照 6 h 后将杏鲍菇已光照处理的一面翻转朝下, 未进行光照处理的一面翻转朝向灯板。通过分析处理 7 d 后杏鲍菇的表型变化, 筛选出杏鲍菇适宜贮存的光照条件。

以上述筛选出的光照条件为处理组, 以黑暗处理(CK1)、超市货架照明(CK2)和超市自然照明(CK3)为对照组, 同时加做单独蓝光(T1)为阳性对照。每 15 个杏鲍菇为一组, 每组 3 个平行, 每个平行 5 个杏鲍菇, 于上述同样条件下进行光照处理, 研究 LED 蓝白复合光对杏鲍菇采后褐变的影响。贮藏期间每间隔 2 d 取样一次, 取样方法为: 每个处理随机抽取 3 个平行, 观察表型, 取样部位为: 菇柄中心段 4~5 cm, 取表皮厚度约 2~3 mm 的组织部分, 每个杏鲍菇取 20~30 g, 保存于 -80 ℃ 下, 用于各项指标的测定。

1.4 指标测定

1.4.1 色泽测定

色泽的测定参考马清华等^[13]的方法, 测定样品为鲜样。使用 CR-400 全自动色差仪测定杏鲍菇表面 L* 值。

1.4.2 褐变度测定

将每个处理的每个平行中的杏鲍菇样品, 采用液氮研磨器研磨成粉末冻样, 后同。每个平行称取 0.5 g 杏鲍菇粉末冻样于离心管中, 加入 4 ℃ 预冷的蒸馏水 5 mL, 4 ℃, 10 000 r/min, 离心 20 min, 收集上清液, 在 410 nm 处测吸光值。

$$D = A_{410\text{ nm}} \times 10 \tag{1}$$

式中:
D——褐变度;
A_{410nm}——上清吸光值, L/(g·cm)。

1.4.3 总酚含量的测定

杏鲍菇中总酚含量的测定参考杨晋恒^[14]的方法, 并稍作修改。取 0.5 g 杏鲍菇杏鲍菇粉末冻样,

加入 2 mL $\phi=80\%$ 的无水乙醇, 避光摇床 1 h, 于 4 °C, 10 000 r/min, 离心 20 min, 收集上清液。取 0.2 mL 上清液, 加入 0.5 mL 福林酚试剂和 1.8 mL 蒸馏水, 再加入 1 mL 饱和碳酸钠, 避光反应 1 h, 760 nm 处测吸光度值。

$$T = \frac{C \times V}{V_1 \times W} \quad (2)$$

式中:

T ——总酚含量, mg/g

C ——标准曲线查得总酚含量, mg;

V ——上清总体积, mL;

V_1 ——反应液中的上清体积, mL;

W ——质量, g。

1.4.4 多酚氧化酶活性测定

粗酶液的制备: 取 1.0 g 杏鲍菇粉末冻样, 加入 4 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲溶液 (pH 值 7.2), 匀浆, 于 4 °C, 10 000 r/min, 离心 20 min, 收集上清液备用。

取 3 mL 0.1 mol/L 邻苯二酚与 500 μ L 酶提取液在 30 °C 下混合均匀, 5 s 后在 398 nm 处测定, 以每分钟 398 nm 处吸光值变化 0.1 为 1 个 PPO 酶活性单位 (U)。

$$P = \frac{A_{398\text{ nm}} \times V}{V_1 \times m \times t \times 0.1} \quad (3)$$

式中:

P ——多酚氧化酶活性, U/g

$A_{398\text{ nm}}$ ——吸光值变化, L/(g·cm);

V ——上清液总体积, mL;

V_1 ——反应液中的上清体积, mL;

t ——时间;

m ——质量, g。

1.4.5 抗氧化酶活性测定

粗酶液的制备: 取 1.0 g 杏鲍菇粉末冻样, 加入 4 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲溶液 (pH 值 7.2), 匀浆, 于 4 °C, 10 000 r/min, 离心 20 min, 收集上清液备用。

将 0.1 mL 粗酶液加入 2 mL 0.05 mol/L 的磷酸缓冲溶液中, 25 °C 预热 5 min, 酶促反应体系由 1 mL 0.2% 的 H_2O_2 溶液和 0.1 mL 酶提取液组成。在 240 nm 处测定, 以吸光值变化 0.1 为 1 个 CAT 酶活性单位 (U)。

$$C = \frac{A_{240\text{ nm}} \times V}{V_1 \times m \times t \times 0.1} \quad (4)$$

式中:

C ——过氧化氢酶活性, U/g;

$A_{240\text{ nm}}$ ——吸光度变化值, L/(g·cm);

t ——时间, 1 min;

V ——提取液总体积, mL;

V_1 ——所取样品提取液体积, mL;

m ——质量, g。

超氧化物歧化酶活性测定参照赵世杰等^[15]的方法。在 50 μ L 粗酶液中各加入 0.3 mL 甲硫氨酸、氮蓝四唑和 EDTA- Na_2 , 最后加入核黄素, 在 4 000 lx 的日光灯下反应 20 min, 以不照光管为空白调零, 于 560 nm 处测定。

$$S = \frac{(A_c - A_b) \times V}{(A_c - A_s) \times V_1 \times m \times t \times 0.5} \quad (5)$$

式中:

S ——超氧化物歧化酶活性, U/g;

A_c ——对照管吸光度值, L/(g·cm);

A_b ——样品管吸光度值, L/(g·cm);

A_s ——空白管吸光度值, L/(g·cm);

V ——提取液总体积, mL;

V_1 ——样品提取液体积, mL;

t ——时间;

m ——质量, g。

1.4.6 过氧化氢含量、超氧阴离子生成速率的测定

使用试剂盒 (江苏晶美生物科技有限公司) 测定鲜切杏鲍菇中过氧化氢的含量。

$$H = \frac{C \times V}{V_1 \times m} \quad (6)$$

式中:

H ——过氧化氢含量, $\mu\text{mol/g}$;

C ——标曲查得过氧化氢的量, $\mu\text{mol/g}$;

V ——提取液总体积, mL;

V_1 ——吸取样品液体积, mL;

m ——质量, g。

超氧阴离子生成速率的测定。取 0.5 g 杏鲍菇粉末冻样于离心管中, 加入 0.1 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 值 7.2) 2 mL, 4 °C, 10 000 r/min, 离心 20 min, 收集上清液。于 1 mL 上清液中加入 1 mL 盐酸羟胺, 25 °C 反应 1 h。各加入 1 mL 对氨基苯磺酸和 α -萘胺, 混匀后 25 °C 保温 0.5 h 进行显色反应, 测定 530 nm 处吸光值。

$$S = \frac{C \times V \times V_1}{V_2 \times m \times t} \quad (8)$$

式中:

S ——超氧阴离子生成速率, nmol/(g·min);

C ——标准曲线查得超氧阴离子含量, μmol ;

V ——上清液总体积, mL;

V_1 ——稀释倍数;

V_2 ——反应液中的上清体积, mL;

t ——时间, 1 min;

m ——质量, g。

1.4.7 DPPH自由基清除率测定

DPPH 自由基清除率测定。取 0.5 g 杏鲍菇粉末冻样于离心管中,加入 2 mL 80% 无水乙醇,避光提取 2 h,于 4 ℃, 10 000 r/min, 离心 20 min, 收集上清液。取 0.5 mL 上清于 2.5 mL 2×10^{-4} mol/L DPPH 溶液中, 避光反应 30 min, 测定 517 nm 处的吸光值。

$$D = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (7)$$

式中:

D ——DPPH 自由基清除率, %;

A_0 ——空白管吸光度值, L/(g·cm);

A_1 ——反应液吸光度值, L/(g·cm)。

1.4.8 电导率测定

参考秦晓艺等^[16]的方法, 略做修改。称取 3 份大小相同(直径 5 mm)的新鲜样品的组织圆片, 每份 2 g, 加入去离子水浸泡 10 min, 冲洗 3 次, 滤纸吸干后加蒸馏水 25 mL, 常温放置 20 min, 用电导仪测定提取液电导率(C_1); 在沸水中浸提 10 min, 快速冷却后再测提取液电导率(C_0)。

$$R = \frac{C_1}{C_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中:

R ——相对电导率, %;

C_0 ——沸水浸提 5 min 后测得的电导率;

C_1 ——常温放置 30 min 后测得的电导率。

1.4.9 丙二醛含量的测定

参考刘红艳等^[17]的方法, 略有改动。取 0.5 g 杏鲍菇粉末冻样于离心管中, 加入 2 mL 5% 的三氯乙酸, 4 ℃, 10 000 r/min, 离心 20 min, 收集上清液。取 2 mL 上清加入 2 mL 0.67% 的硫代巴比妥酸, 沸水浴中煮沸 20 min, 冷却后测定 450、532、600 nm 处吸光值。

$$M = \frac{c \times V_1 \times V}{V_2 \times W} \quad (10)$$

$$c = 6.45 \times (A_{532 \text{ nm}} - A_{600 \text{ nm}}) - 0.56 \times A_{450 \text{ nm}} \quad (11)$$

式中:

M ——丙二醛含量, $\mu\text{mol/g}$;

c ——提取液中丙二醛浓度, $\mu\text{mol/L}$;

V ——提取液总体积, mL;

V_1 ——反应液总量, mL;

V_2 ——反应液中的提取液体积, mL;

W ——质量, g。

1.5 数据处理与分析

使用 Excel 2021 对数据进行统计与整理, 用 Origin 2021 进行相关性分析和主成分分析并作图, 用 SPSS 20.0 进行邓肯氏多重差异分析 ($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 适宜杏鲍菇贮存的光照条件筛选

图 1 为贮藏第 7 天时杏鲍菇的表型, 不同光质和光密度配比处理的杏鲍菇外观品质不一致, 黑暗(CK1)和货架照明(CK2, 蓝光:绿光:红光=3.5:15.5:9.0)处理的杏鲍菇褐变严重并伴有腐烂, 自然照明(CK3, 蓝光:绿光:红光=0.5:2.6:1.2)和单独蓝光(T1, $8.0 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)处理的杏鲍菇也表现出一定程度的褐变; T2~T5 以及 T7~T10 处理组的杏鲍菇也褐变严重并伴有腐烂现象; 而 T6 处理仍表现出较好的表型, 菇柄表面仅出现轻微褐变, 仍具有一定的商品价值。因此我们选择 T6 组的条件[蓝光:绿光:红光=8.4:2.3:1.3]进行后续的实验, 来研究 LED 蓝白复合光对杏鲍菇采后褐变的影响。因此, 我们推测, 高配比的蓝光复合弱红光和绿光处理可有效保持杏鲍菇品质, 当蓝光配比降低时效果减弱; 与本文推测相似, 有学者发现红蓝复合光处理中, 蓝光高配比处理(红:蓝=1:8)的青菜品质优于蓝光低配比处理(红:蓝=1:2/2:1)的青菜^[18]。

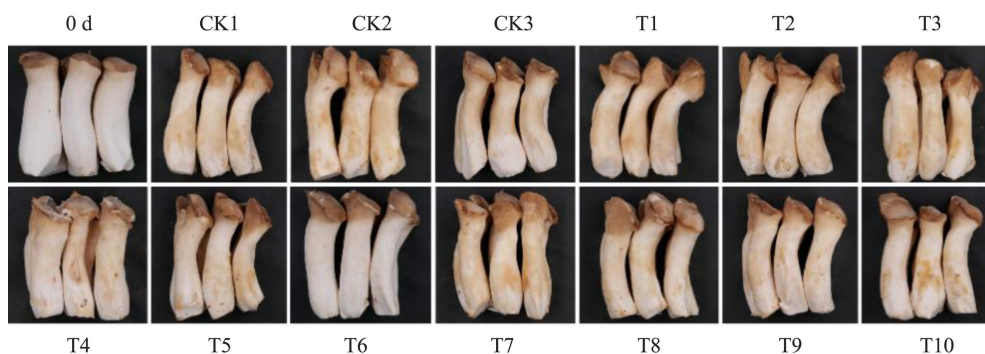


图 1 LED 不同光质和光密度的复合光对杏鲍菇表型的影响

Fig.1 Effect of LED composite light with different light quality and optical density on the phenotype of *Pleurotus eryngii*

2.2 蓝白复合光处理对杏鲍菇褐变相关指标的影响

2.2.1 蓝白复合光处理对杏鲍菇表型及色泽的影响

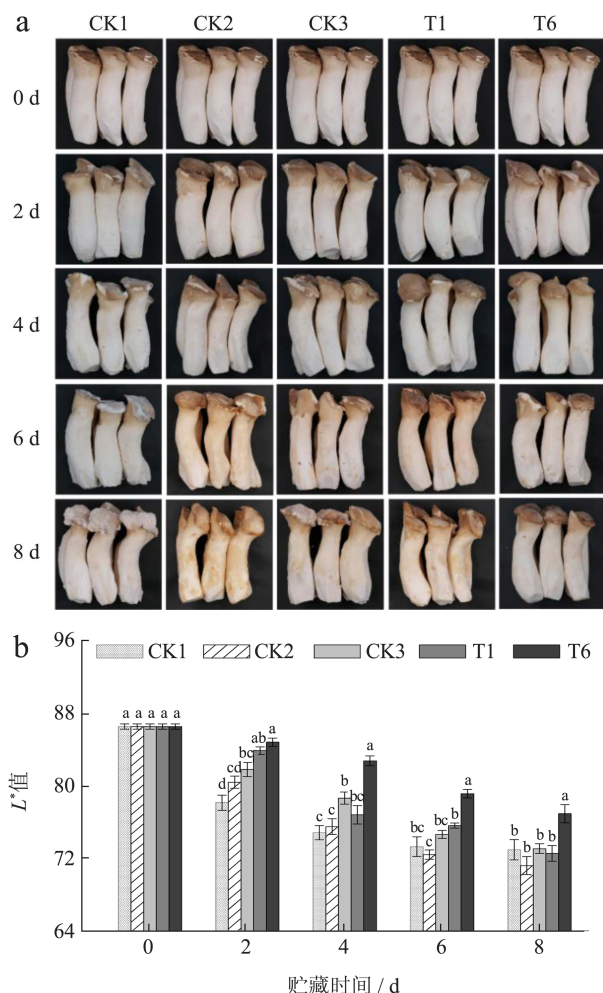


图2 不同光照处理对杏鲍菇外观品质及 L^* 值的影响

Fig.2 Effect of different LED irradiation on the visual quality and L^* value of *Pleurotus eryngii*

注：同一时间点不同字母代表不同组之间存在显著差异 ($P < 0.05$)，后同。

如图2a所示，贮藏第2天，黑暗组（CK1）的菇体表面开始长白色菌丝，货架照明组（CK2）则出现轻微褐变，其他组仍保持较好的外观品质；第4天，黑暗组（CK1）的菇体表面出现大量菌丝并产生轻微褐变，自然照明（CK3）和蓝光组（T1）的菇体也开始出现轻微褐变，此时货架照明组（CK2）的杏鲍菇表面褐变程度进一步加强，而蓝白复合光组（T6）仍未出现明显品质劣变现象；第6天，黑暗组（CK1）出现腐烂现象，货架照明（CK2）、自然照明（CK3）和蓝光（T1）处理的杏鲍菇菇体出现严重褐变，此时蓝白复合光组（T6）则出现轻微褐变；至第8天时，蓝白复合光组（T6）的杏鲍菇褐变程度略微加重，但

菇体表面未出现菌丝和腐烂等现象，保持了较好的品质，而其他处理组则出现了严重的腐烂和褐变现象。

由图2b可知，随着贮藏时间的增加，杏鲍菇菇柄的 L^* 值逐渐降低。贮藏前2 d，CK1、CK2、CK3 处理组之间无明显差异 ($P > 0.05$)，T1 和 T6 处理显著高于 CK1 和 CK2 处理组 ($P < 0.05$)。贮藏4~8 d时，T6 处理组的 L^* 值显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。综上，在整个贮藏过程中，LED 蓝白复合光（T6）处理显著抑制了杏鲍菇 L^* 值的下降，并有效保持其外观品质。朱凯^[6]也发现，蓝光结合 UV 处理可以显著延缓鲜切杏鲍菇色泽劣变，使杏鲍菇保持较好的外观品质。

2.2.2 LED 蓝白复合光对杏鲍菇货架期间褐变度、总酚和多酚氧化酶活性的影响

如图3a所示，在货架期间，杏鲍菇褐变度总体呈上升趋势。其中，CK2 和 CK1 处理无明显差异，CK3 在贮藏期间显著低于 CK1 和 CK2 处理 ($P < 0.05$)，T1 与 CK3 无显著差异。T6 处理在2、6、8 d时褐变度分别为0.78、2.52、2.81，显著低于 CK1、CK2 和 CK3 处理 ($P < 0.05$)。结果表明，与单色光相比，LED 蓝白复合光（T6）抑制杏鲍菇褐变度上升的效果更佳。

杏鲍菇褐变的主要原因在于菇体中酚类化合物含量较高，PPO 能催化多酚氧化成醌类化合物，并与机体中的氨基酸发生聚合反应，产生褐变^[19,20]，从而影响其商品价值。如图3b所示，随着货架时间的延长，各处理组的杏鲍菇总酚含量总体呈上升趋势。其中 T6 和 T1 处理组增加较快，而 CK1、CK2 和 CK3 处理的杏鲍菇总酚含量增加缓慢。由此，T6 处理在整个贮藏期间显著高于 CK1、CK2 和 CK3 处理 ($P < 0.05$)，在第2天时总酚含量为 $1.72 \mu\text{mg/g}$ ，显著高于 T1 处理组 ($P < 0.05$)。因此，在白光的基础上提高蓝光的比例（LED 蓝白复合光）可更有效地提高杏鲍菇中的总酚含量。有研究得出，在相同的光密度下，与白光和红光相比，蓝光处理下香椿芽的总酚含量最高^[21]；而在生菜中发现，在 $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 白光的基础上补充 $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的红光可有效提升其组织的总酚含量^[22]，这可能是由于不同的物种对光照的响应不同。

由图3c可知，货架期间 PPO 活性呈逐渐下降趋势。2 d后 T6 处理组杏鲍菇的 PPO 活性最低，达到了 7.91 U/g ，显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)，CK3 和 T1 处理组在4 d后显著低于 CK1 和 CK2 处理组 ($P < 0.05$)，且两者间无显著性差异。基于以上结果，LED 蓝白复合光（蓝光：绿光：红光=8.4:2.3:1.3）处理可有效抑制杏鲍菇 PPO 活性和保持其组织总酚含量，而货架照明（蓝光：绿光：红光=3.5:15.5:9.0）以

及自然照明（蓝光：绿光：红光=0.5:2.6:1.2）处理则效果不显著。基于此，我们推测高配比的蓝光复合弱红光和绿光处理可通过抑制 PPO 酶活性上升，由此减少酚类物质向醌转化，从而延缓杏鲍菇采后酶促褐变进程，当蓝光配比降低时，该效果减弱甚至消失。有学者也得出在 1R8B（红光：蓝光=1:8）蓝光高配比处理的青菜叶片中 PPO 活性较低，当蓝光配比降低（1R2B 和 2R1B）PPO 活性升高^[18]。

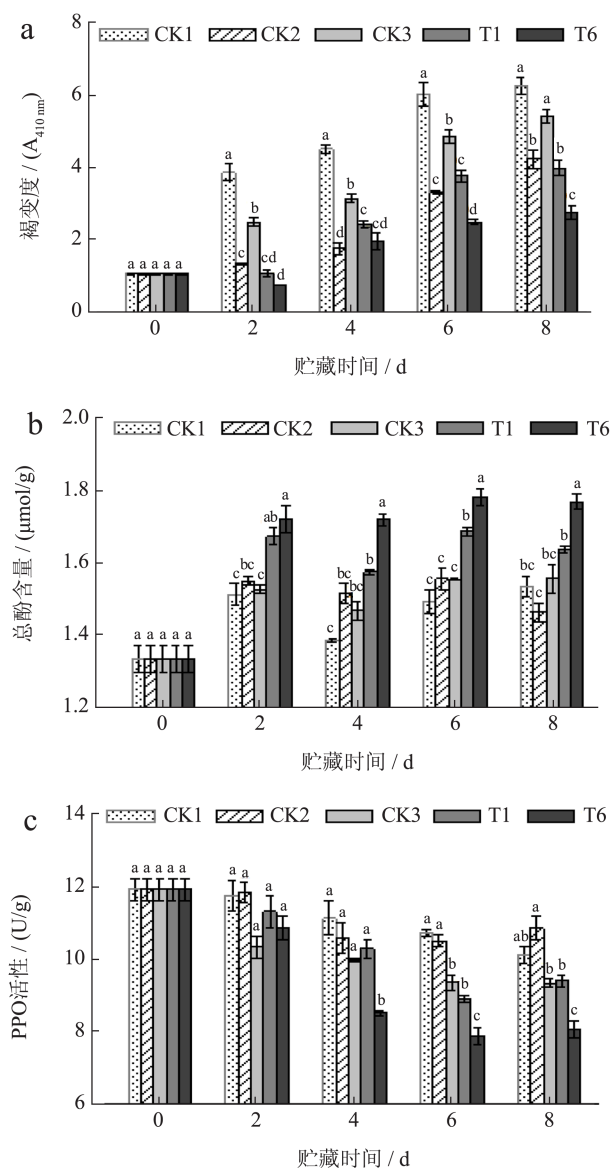


图3 不同光照对采后杏鲍菇褐变度 (a)、总酚 (b) 和 PPO (c) 活性的影响

Fig.3 Effect of different LED irradiation on the browning degree (a), total phenol content (b) and PPO activity (c) of *Pleurotus eryngii* after harvest

2.2.3 LED蓝白复合光对杏鲍菇货架期间抗氧化酶活的影响

当机体出现 ROS 积累时，SOD 能将 O_2^- 催化成

H_2O_2 ^[23]，而 CAT 能够有效降解 H_2O_2 ，减少 H_2O_2 对机体的伤害^[24,25]。调节光质可改变植物中抗氧化酶的活性，从而影响植物对活性氧的清除能力^[26]。由图 4a 可知，货架期间杏鲍菇 CAT 活性呈上升趋势。贮藏 4~8 d 时，T6 处理组的 CAT 活性比 T1 处理组高出 10.33%~18.33%，比 CK3 处理组高出 12.62%~23.57%。在 6~8 d 时，T6、T1 和 CK3 处理组的 CAT 活性显著高于 CK1 和 CK2 处理组 ($P < 0.05$)。由此得知，LED 蓝白复合光 (T6) 处理对保持杏鲍菇 CAT 活性的效果最佳。

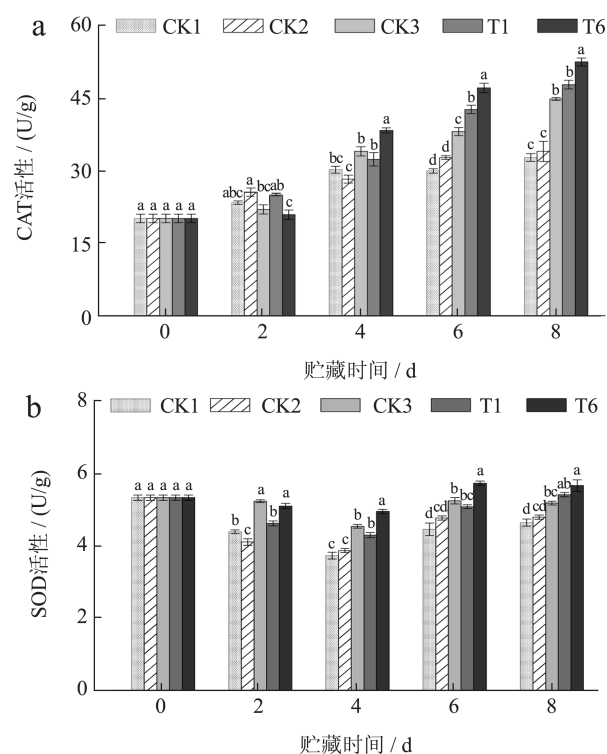


图4 不同光照对采后杏鲍菇 CAT (a) 和 SOD (b) 活性的影响

Fig.4 Effect of different LED irradiation on CAT (a) and SOD (b) activities of *Pleurotus eryngii* after harvest

如图 4b 所示，杏鲍菇中 SOD 活性呈先下降后上升的变化趋势。CK1 和 CK2 在第 4 天时显著低于 CK3、T1 和 T6 处理组 ($P < 0.05$)。CK3 和 T1 处理组的 SOD 活性在 4~6 d 时分别比 T6 处理组低 12.75%~15.09%、9.04%~9.16%。可见，T1 和 T6 处理均有助于保持较高的 SOD 活性，其中 LED 蓝白复合光 (T6) 的效果最好。

2.2.4 LED蓝白复合光对杏鲍菇货架期间 H_2O_2 、 O_2^- 及 DPPH 自由基清除力的影响

采后果蔬在贮藏过程中，机体活性氧不断累积，使细胞膜脂过氧化反应加剧，进而导致细胞膜结构损伤，酚类物质大量泄漏与 PPO 酶接触，酶促褐变反应

加速。图 5a 可以看出, 在贮藏期间 CK1 和 CK2 处理组的 H_2O_2 含量无显著差异, T6 处理在 4~8 d 时显著低于其他处理组 ($P<0.05$), 第 6 d 时, CK3 和 T1 处理的杏鲍菇 H_2O_2 含量分别为 0.39、0.36 $\mu\text{mol/g}$, 显著低于 CK1 和 CK2 处理组 ($P<0.05$)。由此可见, LED 蓝白复合光 (T6) 相比于其他处理组更有利于抑制杏鲍菇 H_2O_2 含量升高。

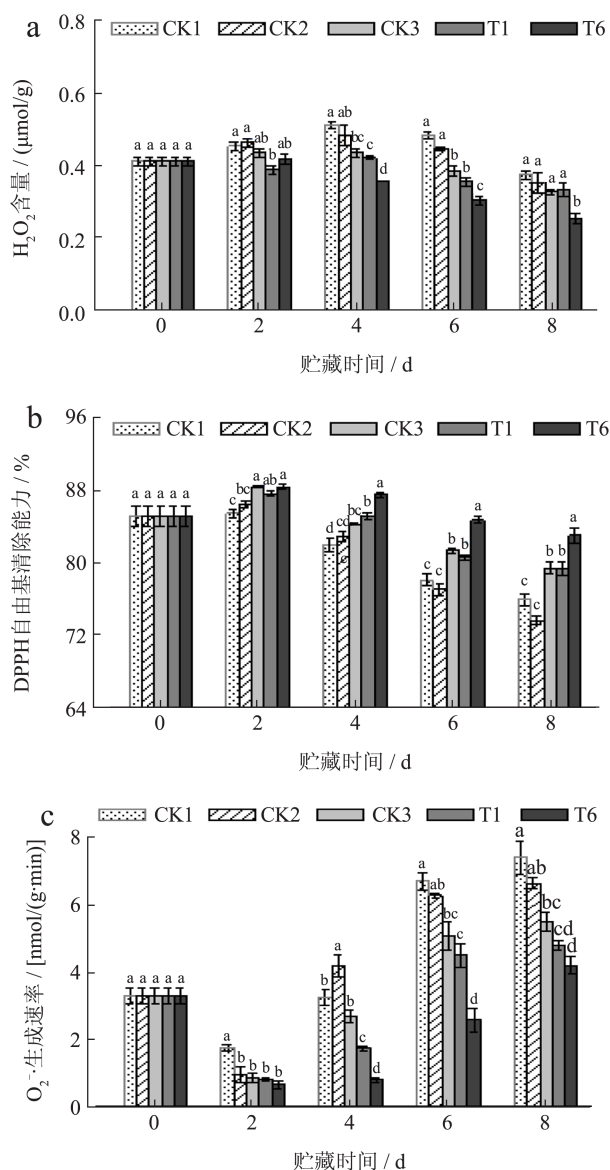


图 5 不同光照对采后杏鲍菇 H_2O_2 (a)、DPPH 自由基清除力 (b)、 O_2^- 产生速率 (c) 的影响
Fig.5 Effect of different LED irradiation on the H_2O_2 (a) content and DPPH free radical scavenging ability (b), O_2^- production rate (c) of postharvest *Pleurotus eryngii*

由图 5b 可知, DPPH 自由基清除率随贮藏时间的延长呈下降趋势。在整个贮藏期间 T6、T1 和 CK3 显著高于 CK1 处理组 ($P<0.05$), 而 CK2 与 CK1 无显著性差异。贮藏 6~8 d 时, T1 和 CK3 处理组的 DPPH

自由基清除率显著高于 CK2 处理 ($P<0.05$)。在 4~8 d 时, T6 处理的杏鲍菇 DPPH 达到了 87.60%, 显著高于 T1 和 CK3 处理 ($P<0.05$)。由此可见, LED 蓝白复合光 (T6) 对抑制杏鲍菇自由基清除率下降的效果最佳。

如图 5c 所示, 在贮藏期间 O_2^- 生成速率总体呈上升趋势, 但不同处理组上升幅度不一致。其中 T1 和 T6 处理组上升较快, 而 CK1、CK2 和 CK3 处理组上升较慢。CK3 处理在 4 d 前显著低于 CK1 和 CK2 处理组 ($P<0.05$), 4 d 后 CK1、CK2、CK3 处理组的 O_2^- 的生成速率分别达到了 3.25~7.39 $\text{nmol}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 、4.19~6.63 $\text{nmol}/(\text{g}\cdot\text{min})$ 和 2.70~5.50 $\text{nmol}/(\text{g}\cdot\text{min})$, 显著高于 T6 处理组 ($P<0.05$)。而在第 4~6 天时 T1 处理是 T6 处理组的 1.74~2.16 倍 ($P<0.05$)。因此, LED 蓝白复合光 (T6) 对减缓杏鲍菇中 O_2^- 生成的效果最佳。

综合 CAT 和 SOD 活性、 H_2O_2 含量、 O_2^- 生成速率及 DPPH 自由基清除力的结果得出, LED 蓝白复合光 (蓝光: 绿光: 红光 = 8.4: 2.3: 1.3) 相较于单独蓝光更有利于增强杏鲍菇的抗氧化能力, 说明弱红光和绿光对提高杏鲍菇的抗氧化性能具有一定的积极作用。郭峰等^[27]研究发现, 绿光有助于提高甘蓝的抗氧化酶活性和延缓其组织膜脂过氧化程度。在荞麦芽苗菜中, 研究者也发现高比例蓝光配低比例红光 (蓝: 红 = 5: 1) 处理对提高其组织抗氧化能力效果优于单色光^[28]; 同样, 蓝光: 红光 = 8: 1 处理的青菜也表现出了类似的结果^[18]。

2.2.5 LED 蓝白复合光对杏鲍菇货架期间相对电导率及丙二醛含量的影响

由图 6a 可知, 杏鲍菇相对电导率呈上升趋势, 这说明随着贮藏时间延长, 杏鲍菇组织细胞膜结构逐渐瓦解。T6 处理组在 2 d 后显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。而 CK2 在 4 d 后与 CK1 处理组并无显著性差异, CK3 和 T1 处理在 2~6 d 时显著低于 CK1 处理组杏鲍菇的相对电导率 ($P<0.05$)。由此说明 LED 蓝白复合光 (T6) 相比于单色光更能有效延缓杏鲍菇相对电导率升高。

由图 6b 可知, 随着贮藏时间的延长, 各处理组杏鲍菇的 MDA 含量逐渐上升。其中 CK1 处理组增加较快, 而 CK2、CK3、T1 和 T6 处理组的杏鲍菇 MDA 含量增加缓慢。T6 处理在整个货架期间显著低于 CK1、CK2 和 CK3 处理 ($P<0.05$)。在 4~8 d 时, T6 处理组的 MDA 含量达到了 0.65~0.93 $\mu\text{mol/g}$, 显著低于 T1 处理组 ($P<0.05$)。可见, 相比于其他处理, LED 蓝白复合光 (T6) 对延缓杏鲍菇菇柄中 MDA 含

量的升高效果最佳。

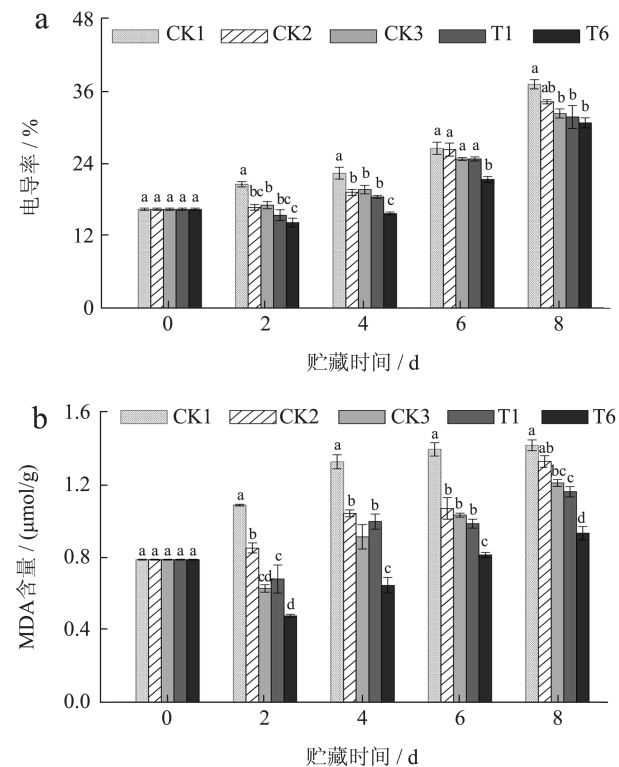


图6 不同光照对采后杏鲍菇电导率 (a) 和 MDA 含量 (b) 的影响

Fig.6 Effect of different LED irradiation on conductivity (a) and MDA content (b) of *Pleurotus eryngii* after harvest

2.2.6 相关性分析

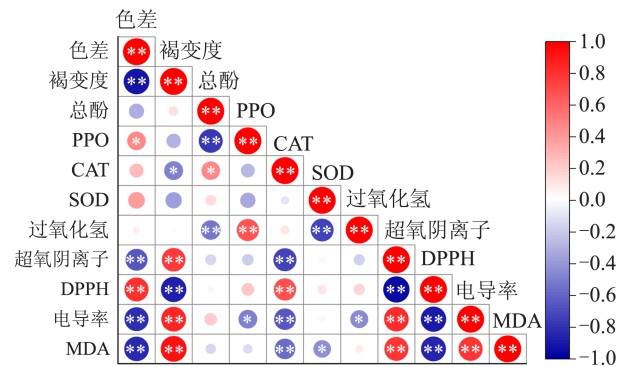


图7 杏鲍菇褐变度与其他指标之间的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between browning degree and other indexes of *Pleurotus eryngii*

注: *表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$).

所有指标的相关系数见图7。从图中可以看出,杏鲍菇组织褐变度与色差值、DPPH 自由基清除力呈极显著负相关 ($P<0.01$, 下同), 与 CAT 活性呈显

著负相关 ($P<0.05$, 下同), 与 O_2^- 生成速率、相对电导率以及 MDA 含量呈极显著正相关; 总酚含量与 PPO 活性、 H_2O_2 含量呈极显著负相关, 与 CAT 活性呈显著正相关; PPO 分别与 H_2O_2 含量、相对电导率呈极显著正相关和显著负相关; CAT 活性与 O_2^- 生成速率、相对电导率、MDA 含量呈极显著负相关, 与 DPPH 自由基清除力呈极显著正相关; SOD 活性分别与 H_2O_2 含量、MDA 含量呈极显著负相关和显著负相关; H_2O_2 含量与相对电导率呈显著负相关; O_2^- 生成速率与 DPPH 自由基清除力呈极显著负相关, 与相对电导率、MDA 含量呈极显著正相关; DPPH 自由基清除力与相对电导率、MDA 含量呈极显著负相关; 相对电导率与 MDA 含量呈显著正相关。

可见, LED 蓝白复合光 (蓝光: 绿光: 红光 = 8.4: 2.3: 1.3) 处理的杏鲍菇组织褐变程度与其活性氧代谢指标密切相关。综合抗氧化酶、活性氧和 MDA、相对电导率的结果, 我们推断该处理通过提高杏鲍菇组织的抗氧化酶活性, 由此有效清除杏鲍菇中的活性氧, 减轻其膜脂过氧化速度和有害物质 MDA 的产生, 保护其细胞完整性, 从而延缓酚类物质与 PPO 酶接触产生褐变。与此推测相符, 我们的研究结果显示, LED 蓝白复合光可抑制其组织 H_2O_2 含量和 MDA 含量上升。同样, 在连续的红蓝复合光中加入绿光可提高生菜的抗氧化酶活性, 抑制 MDA 含量的上升, 减少由 ROS 引起的组织褪绿和膜脂过氧化^[29]。

2.2.7 主成分分析

如图 8a 所示, 前 3 个主成分 PC1、PC2、PC3 的贡献率分别为 53.2%、25.5%、15.6%, 累计贡献率达到 94.3%, 可较好的反应整体数据。其中, 褐变度、 O_2^- 、MDA、相对电导率在 PC1 的正坐标处均具有较高的载荷, 色差、CAT、DPPH 在 PC1 的负坐标处具有较高的载荷。褐变度、PPO、 H_2O_2 、 O_2^- 、MDA 在 PC2 的正坐标处具有较高载荷, 总酚、CAT、SOD、DPPH 在 PC2 的负坐标处具有较高载荷。此外, PC1、PC2、PC3 还较好的反映了不同处理下杏鲍菇的贮藏品质, 如图 8b 所示, 贮藏 2 d 时的对照组与贮藏 2~6 d 时处理组品质较为接近, 贮藏 6~8 d 时的对照组与处理组相距较远。PC2 还较好地将处理组和对照组整体区分开来, 即处理组样本大致集中在 PC2 负坐标处, 对照组样本集中分布在 PC2 正坐标处, 且处理组样本主要集中在坐标轴零点附近, 对照组则远离零点, 表明 LED 蓝白复合光 (T6) 能有效延缓杏鲍菇品质劣变的进程。

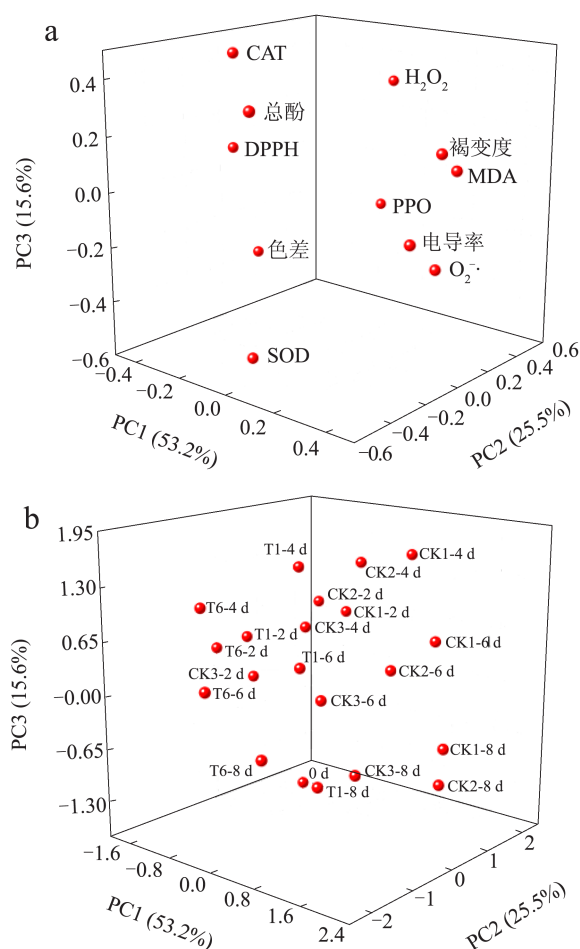


图8 不同光照处理对杏鲍菇因子载荷和得分的影响

Fig.8 Effect of different LED irradiation on the PCA loadings and PCA scores of *Pleurotus eryngii*

3 结论

本实验采用避光、货架照明以及自然照明、单独蓝光和LED蓝白复合光处理杏鲍菇,结果得出LED蓝白复合光可通过提升杏鲍菇组织的抗氧化酶活性来提高DPPH·和O₂⁻清除能力,由此保持其组织较低的H₂O₂和MDA含量,从而延缓其组织酚类物质被PPO酶催化发生酶促褐变,使得该处理的杏鲍菇组织褐变度在2~8 d期间比对照组低了0.90~5.00倍,最终保持了杏鲍菇的采后品质。此外,结合主成分和相关性分析结果,LED蓝白复合光处理能显著抑制杏鲍菇的采后褐变。本文可为LED光照应用在食用菌保鲜方面提供了理论及技术支持,研究的LED光照保鲜技术可通过升级改造超市货架柜的照明系统,并配套光照保鲜参数来实现,在实际应用中具有较强的可行性。

参考文献

[1] 张晨.杏鲍菇菌丝体多糖的分离纯化及抗衰老、抗糖尿病活性

分析[D].泰安:山东农业大学,2018.

- [2] DUHOST N J, OU B, BEELMAN R B. Quantification of polyphenols and ergothioneine in cultivated mushrooms and correlation to total antioxidant capacity [J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 727-735.
- [3] NIE X B, ZHANG R C, CHENG L L, et al. Combining the biocontrol yeast *Pichia kluyveri* with UV-C treatment to control postharvest decay of king oyster mushrooms (*Pleurotus eryngii*) caused by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* [J]. Biological Control, 2020, 149: 104327.
- [4] DU M R, LIAN L D, ZHANG Y C, et al. Roles of ROS metabolism and phenylpropanoid pathway in quality maintenance of postharvest *Pleurotus eryngii* under hyperoxia stress [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 207: 112617.
- [5] MA J, YU W C, LI S H, et al. Transcriptome analysis reveals the mechanism of polyethylene atmosphere packaging delaying browning of postharvest *Pleurotus eryngii* [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 323: 112531.
- [6] 朱凯.LED蓝光结合UV处理对鲜切杏鲍菇贮藏品质的调控研究[D].福州:福建农林大学,2022.
- [7] 孔得慧,赵文婷,马越,等.LED光照处理对鲜切番茄冷藏期间品质和抗氧化能力的影响[J].食品科技,2021,46(5):45-52.
- [8] 刘帮迪,张雅丽,柯泽华,等.LED光照对青熟香蕉贮藏中后熟调控的影响[J].农业工程学报,2021,37(20):295-302.
- [9] 李洋,袁迪,陈丰.不同波长LED光源照射对采后冷藏蓝莓理化品质的影响[J].现代食品科技,2024,40(5):119-126.
- [10] JIANG A L, ZUO J H, ZHENG Q L, et al. Red LED irradiation maintains the postharvest quality of broccoli by elevating antioxidant enzyme activity and reducing the expression of senescence related genes [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 251: 73-79.
- [11] SONG Y, QIU K, GAO J, et al. Molecular and physiological analyses of the effects of red and blue LED light irradiation on postharvest senescence of pak choi [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 164: 111155.
- [12] XIE C Y, TANG J, XIAO J X, et al. Purple light-emitting diode (LED) lights controls chlorophyll degradation and enhances nutraceutical quality of postharvest broccoli florets [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 294(27): 110768.
- [13] 马清华,蔡铭,谢春芳,等.聚乙烯醇基SiO₂/TiO₂纳米包装膜制备及对双孢菇保鲜效果[J].食品科学,2020,41(9):182-187.
- [14] 杨晋恒.不同处理对香菇采后品质及生理的影响[D].南京:南京农业大学,2017.
- [15] 赵世杰,史国安,董新春.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业科学技术出版社.
- [16] 秦晓艺,王杰,李丹青.不同采收期与采后处理方法对杏鲍菇贮藏品质的影响[J].食品与发酵工业,2015,41(3):118-123.
- [17] 刘红艳,张雷刚,胡花丽,等.气调处理对绿芦笋抗氧化及抗病酶活性的影响[J].核农学报,2017,31(6):1119-1127.
- [18] 孙洪助.红蓝光比例对绿叶蔬菜生理特性及品质的影响[D].南京:南京农业大学,2014.
- [19] 牛耀星,王霆,毕阳,等.温度对金针菇贮藏品质的影响及货架期

的预测模型[J].食品科学,2021,42(1):264-271.

[20] DING Y, MO W, DENG Z, et al. Storage quality variation of mushrooms (*Flammulina velutipes*) after cold plasma treatment [J]. Life, 2022, 13(1): 70.

[21] DING S S, SU P F, WANG D C, et al. Blue and red light proportion affects growth, nutritional composition, antioxidant properties and volatile compounds of *Toona sinensis* sprouts[J]. LWT, 2023, 173: 114400.

[22] 李倩.光质对生菜、丹参生长和次生代谢物的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.

[23] 刘英,于雪莹,于莉莉,等.UV-B辐射下不同树龄杜仲叶片光合及部分生理特性的变化[J].东北林业大学学报,2020,48(6):42-46,50.

[24] 巩晋龙.杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*) 冷藏保鲜技术及自溶机理研究[D].福州:福建农林大学,2013.

[25] 李志刚,宋婷,冯翠萍,等.不同温度对杏鲍菇减压贮藏品质的影响[J].农业工程学报,2015,31(3):332-338.

[26] 胡举伟,郑磊,孟鑫,等.不同红蓝光配比对樱桃幼苗形态发育、抗坏血酸和活性氧代谢的影响[J].中国果树,2024,4:55-60,70.

[27] 郭峰,孙莹,安容慧,等.LED绿光处理对甘蓝采后品质及抗氧化活性的影响[J].江苏农业学报,2023,39(2):489-497.

[28] 吕铮.不同LED光质对荞麦芽苗菜生长及品质的影响[D].吉林:吉林农业大学,2023.

[29] BIAN Z H, YANG Q C, LI T, et al. Study of the beneficial effects of green light on lettuce grown under short-term continuous red and blue light-emitting diodes[J]. Physiologia Plantarum, 2018, 164(2): 226-240.