

双孢蘑菇采后冷链流通过程品质劣变及活性氧代谢规律

王彪¹, 王震², 负建民^{1*}, 李文辉¹, 郭更新¹, 屈玉玲¹

(¹甘肃农业大学食品科学与工程学院 兰州 730070

²新疆农垦科学院农产品加工研究所 新疆石河子 832000)

摘要 探究双孢蘑菇采后冷链流通过程中子实体品质劣变及其活性氧代谢的变化规律。本试验对双孢蘑菇子实体在采后预冷、冷链运输过程及模拟低温货架期的感官品质、主要生理指标及活性氧代谢情况进行动态测定,并运用 Pearson 相关性分析软件探究品质劣变与生理指标及活性氧代谢之间的相关性。结果显示:冷链流通过程中,双孢蘑菇在预冷及冷链运输过程中品质变化不大,而在模拟超市低温货架期(12℃±1℃)贮藏期间出现品质逐渐劣变。在第 3 天出现呼吸高峰,之后其感官品质迅速下降,主要表现为萎蔫、褐变、开伞、质地软化等。同时,其生理指标也发生了显著变化,表现在可溶性固形物(SSC)含量、总抗氧化能力(T-AOC)下降,相对电导率(RC)、总酚(TP)、丙二醛(MDA)、O₂^{·-}和 H₂O₂ 的含量及活性氧(ROS)代谢相关酶活性呈动态上升的趋势。通过 Pearson 相关性分析得出:双孢蘑菇采后褐变与多酚氧化酶(PPO)活性、总酚含量、丙二醛含量的变化存在显著相关性,且褐变受到多酚氧化酶、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性和酚类物质含量变化的影响。其中褐变与多酚氧化酶的相关性最高(R²=0.95),失重率(WL)与丙二醛含量变化有很强的相关性(R²=0.90)。随着贮藏时间的延长 ROS 不断积累,而抗氧化酶系中虽然 PPO 酶活性呈上升趋势,而总抗氧化能力呈下降趋势,导致其贮藏品质劣变加速。根据这些规律可更准确预测双孢蘑菇货架期,并为采后冷链流通与货架销售期间品质监测提供一定的理论指导。

关键词 双孢蘑菇; 冷链流通; 品质劣变; 相关性分析; 生理变化; 活性氧代谢

文章编号 1009-7848(2024)09-0375-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.09.035

双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)因富含维生素以及具有抗氧化能力等优点而成为世界上消费最广的食用菌^[1],占食用菌总量的 10%^[2]。双孢蘑菇采后品质极易劣变,导致鲜菇的分销和销售困难,这主要是由于其采后仍进行着活跃的呼吸代谢过程,导致品质快速劣变,如水分流失、褐变、质地软化、腐败微生物爆发等,使其在冷链流通过程的商品价值下降,很大程度降低了其食用品质和经济价值^[3]。

鲜菇采后主要通过冷链运输到超市或者市场^[4]。在我国,通常种植区域在距离大城市 4~6 h 车程的农村地区,由于运输距离较远,在运输过程以及超市销售过程中都会出现品质劣变。有关低温保藏过程中蘑菇品质变化已有大量研究报道,

例如,Ni 等^[5]研究表明,利用采后低温贮藏技术来保持蘑菇的品质,对蘑菇产业是有利的。Walkowiak-Tomczak 等^[6]研究发现,蘑菇在运输和短期贮藏过程中,子实体因酶活性和氧化过程而变暗。通过将贮藏温度从 25℃降到 3℃,蘑菇的褐变率减少了 75%^[7]。低温可以有效减缓微生物的生长,降低蘑菇的呼吸速率,并最大限度地减少它们的水分流失^[8]。目前关于双孢蘑菇在整个冷链流通过程中品质劣变及其理化指标的变化规律鲜见研究报道。

双孢蘑菇采后品质变化一般与活性氧含量的增加密切相关^[9]。由于双孢蘑菇采后贮藏条件和采前生长条件的显著差异,使得双孢蘑菇在贮藏时其子实体细胞内电子传递链无法正常传递,进而导致 ROS 大量积累^[10],后者的过载表达可能会破坏细胞器,抑制酶的生物活性,并造成蛋白质、脂肪的氧化损伤等^[11],这一过程可被认为是一种非生物胁迫^[3]。同时,双孢蘑菇体内的活性氧清除体系在上述氧化过程中发挥着清除氧化因子、修复损伤的作用,可在一定程度上改善其品质。双孢蘑

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 甘肃省科技重大专项(21ZD4NA016);“十三五”国家重点研发计划重点专项(2018YFD0400205)

第一作者: 王彪,男,硕士生

通信作者: 负建民 E-mail: yunjianmin@gsau.edu.cn

菇体内的活性氧清除体系包括 PPO、SOD、CAT、POD 等抗氧化酶, 它们与双孢蘑菇子实体内抗氧化活性以及采后品质变化密切相关^[12]。

为此, 本试验以新鲜双孢蘑菇(A15)子实体为研究对象, 采后在 2~4 °C 预冷 2 h, 之后跟踪研究 4~6 h 实际冷链流通(8 °C±2 °C)过程及其在模拟超市冷藏货架柜(12 °C±1 °C)销售 6 d 期间的贮藏试验, 通过 Pearson 相关性分析, 探究双孢蘑菇子实体品质劣变与感官评价指标、相对电导率、总酚、可溶性固形物、丙二醛、游离氨基酸(free amino acids, FAA)、O₂^{·-}、H₂O₂ 含量以及 PPO、SOD、CAT、POD 等抗氧化酶活性的变化规律, 明确其品质变化与活性氧代谢指标变化间的相关性, 以期为双孢蘑菇采后冷链流通过程中品质监控提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

双孢蘑菇(*Agaricus bisporus* A15), 甘肃金沃森生物科技有限公司。

硫代巴比妥酸(TBA)、聚乙二醇 6000(PEG 6000)、三氯乙酸(TCA)、氮蓝四唑(NBT)、L-蛋氨酸(MET)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、交链聚乙烯吡咯烷酮(PVPP), 天津光复精细化工研究所, 均为分析纯。

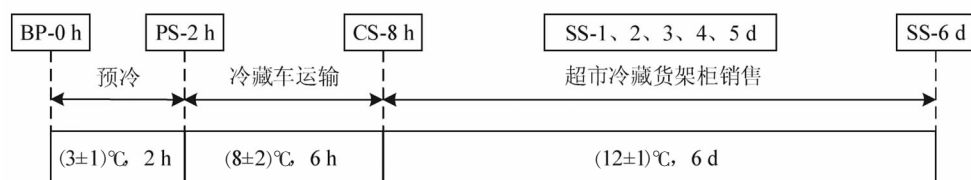
1.2 仪器与设备

液-质谱联用仪, 美国安捷伦公司; 四元梯度超快速液相色谱仪, 美国 Waters 公司; TA.XT plus 型质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; Ci6x 分光光度仪, 美国 X-Rite; DDS-307A 电导率仪, 上海仪电科学仪器股份有限公司; JFQ-3150H 果蔬呼吸仪, 北京均方理化科技研究所; UV756CRT 紫外-可见分光光度计, 上海佑科仪表有限公司; W015R 型手持折射仪, 日本爱拓科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料处理及冷链流通模拟试验条件 双孢蘑菇(*A. bisporus*, A15)采自金沃森生物科技有限公司。双孢蘑菇采收后在 2~4 °C 预冷(冷库风冷)2 h, 预冷后经冷藏车运输(8 °C±2 °C, 4~6 h)送至实验室, 挑选菇盖 30~40 mm, 颜色洁白, 大小均匀, 朵形端正, 菇体完整, 未开伞, 无病虫害和无机械损伤的子实体约 45 kg, 分装在 225 个 UV 灭菌聚乙烯塑料盒中(每盒装 6 个蘑菇), 在模拟超市冷藏货架柜的冷库中(12 °C±1 °C, 相对湿度为 85%~90%)贮藏 6 d。

具体冷链流通过程如图 1。贮藏过程定期采样, 共 9 个取样时间点, 即预冷前(BP-0 h)、预冷待运(PS-2 h)、冷藏车运输(CS-8 h)、货架销售/冷藏过程(SS-1 d、SS-2 d、SS-3 d、SS-4 d、SS-5 d、SS-6 d)。



注: BP 表示预冷前; PS 表示预冷待运; CS 表示冷藏车运输; SS 表示货架销售; 下同。

图 1 模拟双孢蘑菇采后冷链流通过程

Fig.1 Process of simulated cold chain circulation for postharvest *A. bisporus*

1.3.2 双孢蘑菇品质指标的测定

1.3.2.1 感官评分 根据 Lin 等^[13]的方法并修改进行感官评价。选择颜色、有无异味、菌盖形态、质地和消费者接受度 5 个关键属性进行评价, 由受过专业培训的 10 人进行。每个样品的感官评分计算为平均值。每次以新鲜菇为对照(得分=10)。感官评价标准详见表 1(采用 0~10 分制)。

1.3.2.2 失重、硬度、褐变指数的测定 失重率采用重量法参照 Duan 等^[14]的方法测定, 以蘑菇初始质量的质量损失百分比表示。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{(M_0 - M_1)}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

式中: M_0 为原始菇重, g; M_1 是贮藏后的质量, g。

表 1 双孢蘑菇感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation standard of *A. bisporus*

评分	菇体色泽(S1)	菌盖形态(S2)	异味(S3)	菇体质地(S4)	整体接受度(S5)	感官评分
10~8	洁白有光泽	菌盖完整,闭合	无异味	有弹性	非常满意	—
8~6	轻微褐变较有光泽	菌盖完整,微开	轻微异味	轻微萎蔫	满意可接受	—
6~4	明显褐变、无光泽	菌盖完整,半开	明显异味	有萎蔫	不满意勉强可接受	—
<4	严重褐变、无光泽	菌盖完整,全开	严重异味	严重萎蔫	不可接受	—

注:感官评分=S1+S2+S3+S4+S5。

硬度参照 Kotwaliwale 等^[15]的方法进行测定。将试样置于 TA-XT plus 型质构仪平台,选用 P/36R 探头进行 TPA 试验。参数设置为:预压速度、下压速度、压后上行速度均为 5 mm/s,两次压缩中间停顿 10 s,试样压缩比为 40%,触发力值 5 N,测定硬度(Firmness)(单位:N)。每个双孢蘑菇分别取菌盖(1 cm×1 cm×1 cm)样品进行检测,每个处理用双孢蘑菇 10 个,重复 3 次。

褐变指数(BI)参照 Gao^[16],Fernandes 等^[17]的方法进行测定。采用 Ci6x 便携式分光光度仪于待测双孢蘑菇菌盖测定色差 3 次, L 表示亮度, a 正值表示偏红,负值表示偏绿; b 正值表示偏黄,负值表示偏蓝;测定结果与标准颜色(L_0, a_0, b_0)进行比较,以 ΔE 表示整体颜色变化,每 1 d 测定 1 次。

$$\Delta E = [(L-L_0)^2 + (a-a_0)^2 + (b-b_0)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: ΔE 是整体颜色变化的程度,并遵循公式计算:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

褐变指数(BI)参数的计算公式:

$$BI = \frac{100(x-0.31)}{0.17} \quad (3)$$

$$\text{式中: } x = \frac{(a+1.75L)}{(5.645L)+(a-3.012b)}$$

1.3.2.3 呼吸速率和开伞指标的测定 参照 Gong 等^[18]的方法采用果蔬呼吸仪(JFQ-3150H)进行测定。将双孢蘑菇单独放在密封的罐子里,打开阀门让空气进入。以二氧化碳浓度($\mu\text{g}/\text{kg}/\text{s}$)来表示。每组测定使用 10 个蘑菇子实体作为 1 个处理,重复 3 次。

$$\text{开伞度}(\%) = \frac{\sum(\text{开伞级别} \times \text{该级子实体数})}{(5 \times \text{子实体总数})} \times 100 \quad (4)$$

0 级,无开伞;1 级,开伞胀开度在 0~5%;2

级,开伞胀开度在 5%~20%;3 级,开伞胀开度在 20%~50%;4 级,开伞胀开度在 50%~80%;5 级,开伞胀开度在 80%~100%。

1.3.2.4 游离氨基酸测定 参考马宁等^[19]的方法测定。称取冻干蘑菇粉 0.5 g,加入 6 mol/L HCl (50 mL)在室温下反应 45 min,然后在 10 000 g 离心 15 min,取上清液待测。

1.3.3 双孢蘑菇采后生理指标的测定

1.3.3.1 相对电导率(RC)和丙二醛(MDA)含量的测定 RC 参考 Lin 等^[13]的方法进行测定。取双孢蘑菇样品 5.0 g 置于锥形瓶中,加入 40 mL 蒸馏水,摇晃后立刻以电导率仪测定电导率值 P_0 ,10 min 后测定电导率值 P_1 ;然后煮沸 10 min,冷却至室温后用蒸馏水补齐至 40 mL 溶液体积,测定电导率值 P_2 。按下面公式计算样品的相对电导率:

$$\text{相对电导率}(\%) = \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0} \times 100 \quad (5)$$

MDA 含量参考 Duan 等^[20]的方法进行测定。测定了水相在 450,532 nm 和 600 nm 处的吸光度。水相中的丙二醛含量按下式计算:

$$\text{丙二醛含量}(\text{mmol}/\text{kg}) = [6.45 \times (A_{532\text{nm}} - A_{600\text{nm}}) - 0.56 \times A_{450\text{nm}}] \quad (6)$$

1.3.3.2 可溶性固形物(SSC)含量的测定 采用 W015R 型手持折射仪进行测定。测试时将双孢蘑菇汁液滴入棱镜表面,等待几秒后读取度数即为可溶性固形物含量值,其含量用%表示。

1.3.3.3 总酚(TP)含量的测定 参照 Fattahifar 等^[21]的方法进行测定。称取蘑菇样品 2.5 g,加入少量含 1% HCl 的甲醇溶液,研磨成匀浆,用含 1% HCl 的甲醇溶液洗涤研钵,转移到 20 mL 试管中,摇匀,放入冰箱静置 24 h,过滤,稀释 5 倍后以含 1% HCl 的甲醇溶液为对照,在 280 nm 处测定吸光值。以没食子酸标准曲线来计算总酚含量。

1.3.3.4 总抗氧化能力(T-AOC)的测定 使用索莱宝试剂盒(北京索莱宝科技有限公司),通过铁还原/抗氧化能力(FRAP)方法进行测定。

1.3.3.5 活性氧(ROS)含量的测定 $O_2\cdot^-$ 和 H_2O_2 含量参考 Wu 等^[22]的方法进行测定。

1.3.3.6 酶活的测定 双孢蘑菇样品粗酶液的制备:取 4.0 g 双孢蘑菇样品,冰浴研磨后,加入 36.0 mL 50 mmol/L 的磷酸缓冲液(0.2 mmol/L EDTA、0.002 g/L PVP,pH=7.8)。涡旋振荡后以 10 000×g、4 °C离心 20 min,取上清液待测定。

参照 Gao 等^[16]的方法,测定 PPO 活性;参考 Yao 等^[23]的方法,测定 SOD 活性;参考 Gao 等^[16]的方法,测定 POD 活性;参考 Zhang 等^[24]的方法,测定 CAT 活性。

1.4 数据处理

试验结果进行 3 次重复,均以平均值±标准偏

差表示($\bar{x} \pm s$),使用 IBM SPSS 26.0 对试验数据进行显著性和相关性分析,利用 Origin 2018 进行作图,Pearson 相关矩阵分析通过 genescloud (<https://www.genescloud.cn>)工具进行分析。

2 结果

2.1 冷链流通过程中双孢蘑菇品质和感官评价的变化

双孢蘑菇子实体采后品质变化可以直观地体现在菌盖色泽、开伞程度的变化。双孢蘑菇采后感官品质变化及消费者接受程度评分结果见图 2。贮藏期间感官品质(图 2a)和整体可接受感官评分(图 2b)的动态变化趋势基本一致,均表现为持续下降,在整个冷链流通过程中,双孢蘑菇在预冷及其冷链运输到目的地过程中品质变化不显著,主要在模拟超市低温货架期温度贮藏过程逐渐出

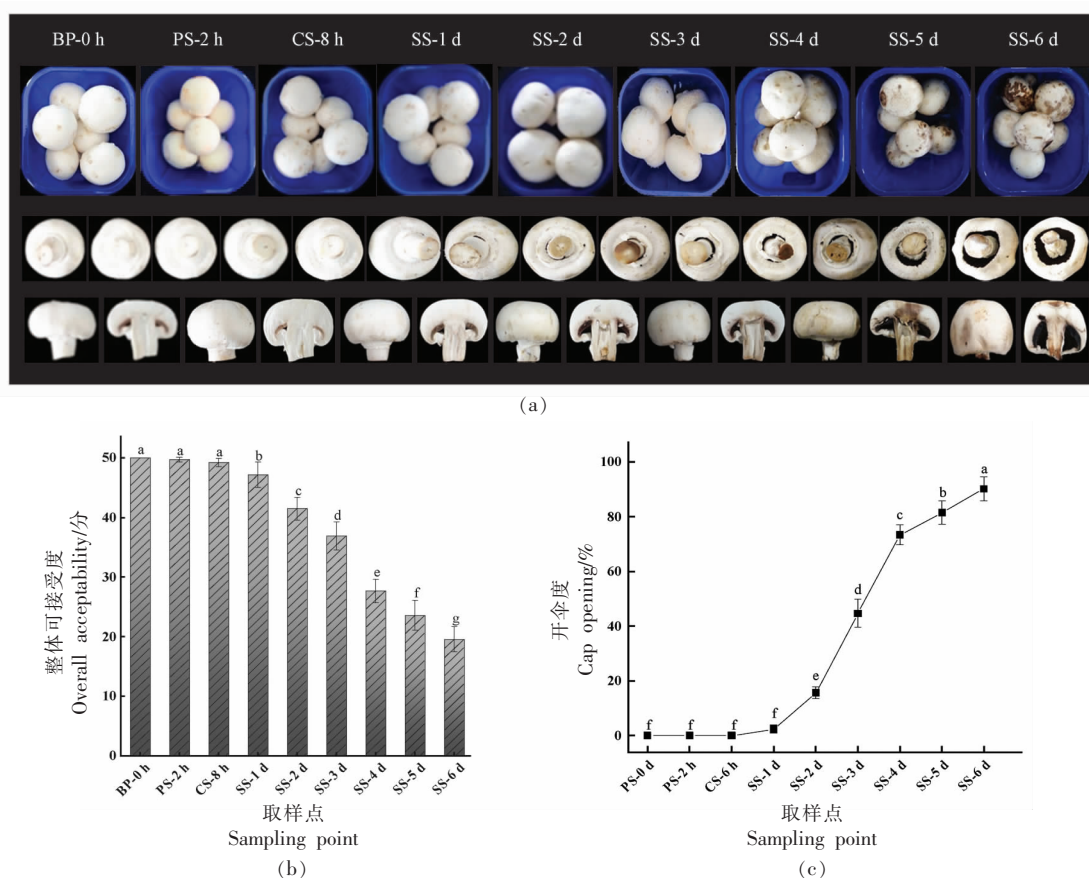


图 2 双孢蘑菇采后冷链流通过程中感官品质(a)整体接受程度评分(b)和开伞度(c)变化

Fig.2 Changes in sensory quality (a) overall acceptability (b) and the cap opening (c) of *A. bisporus* during cold chain circulation

现品质劣变。从图 2a 中可以看出,双孢蘑菇采后在第 3 天时,开始出现褐变、萎蔫、发黏的迹象,整体可接受感官评分(图 2b)也显著下降,说明双孢蘑菇采后在第 3 天时品质变化可以直观的从感官品质上体现出来。开伞是双孢蘑菇最典型的劣变表现,从图 2a 和图 2c 可以看出,在整个冷链流通过程中,预冷及其冷链运输到目的地过程中开伞不显著,在模拟超市低温货架期温度贮藏过程第 2 天出现开伞现象,并随贮藏时间延长逐渐增大。

2.2 冷链流通过程中双孢蘑菇失重率和质地的变化

采后双孢蘑菇会继续生长发育,主要体现在菌柄伸长,开伞以及担孢子成熟释放,这一过程主要是由其内在的遗传因子、细胞生长和细胞凋亡相互影响的结果^[25]。采后双孢蘑菇由于失去了其外在营养物质的供给,为完成上述过程所需的能量必须由菇体自身蛋白质和其它营养物质的分解来供能,在这些过程中水作为其最重要的载体,对其进行这些生命活动非常重要,而双孢蘑菇在采

后品质变化过程中很容易失水,这是由于其表面没有像其它果蔬的蜡质层保护结构^[26],水分的快速流失成为导致其重量减轻最主要原因,如图 3a 所示,双孢蘑菇采后品质变化进程中失重率随采后时间的变化呈现持续上升趋势,其中,在预冷及其冷链运输到目的地过程中失重不显著,失重主要发生在超市低温货架期温度贮藏时期,在第 3 天时失重率达到 6.83%(>5%),已经完全失去了其商品价值^[27]。因此,通过保持双孢蘑菇采后子实体中的水分,延缓组织降解,成为采后延缓双孢蘑菇品质变化的关键。双孢蘑菇在采后由于菇体变化使其组织软化,采后品质变化过程中双孢蘑菇质地的变化见图 3b。从图中可知在采后品质变化过程中菇体硬度呈逐渐下降的变化趋势,在预冷及冷链运输过程中硬度变化不显著,在模拟超市低温货架贮藏时期呈显著下降趋势,其质地的变化可能是由于双孢蘑菇菇体中蛋白质和多糖降解、菌丝萎缩和细胞中心液泡破裂导致的^[28]。

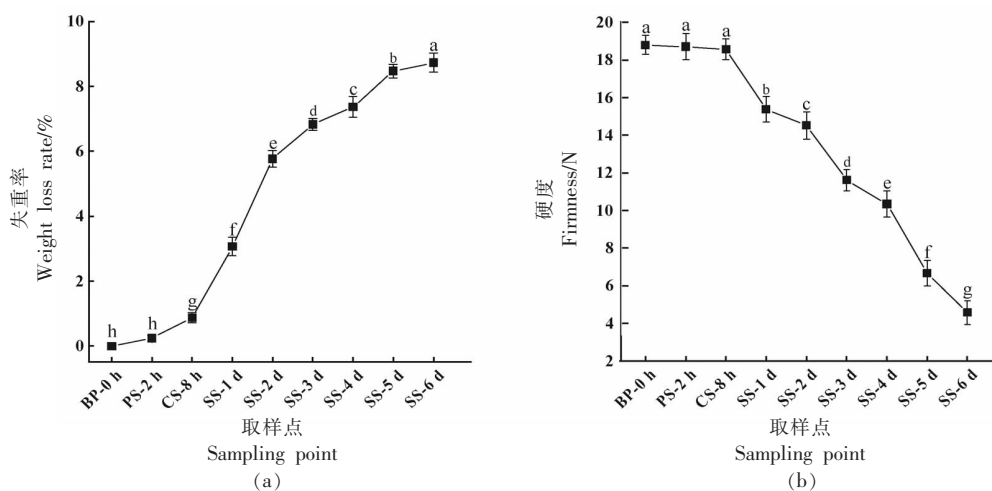


图 3 双孢蘑菇采后冷链流通过程中失重率(a)和硬度(b)变化

Fig.3 Changes in weight loss rate (a) and firmness (b) of *A. bisporus* during postharvest cold chain circulation

2.3 冷链流通过程中双孢蘑菇呼吸速率和色泽的变化

呼吸作用在双孢蘑菇采后不仅为子实体的生命活动提供所需的能量,同时也是各类有机物相互转化的中枢,是能量来源的主要途径^[29]。由图 4a 可知,双孢蘑菇采后呼吸速率在模拟超市低温货架贮藏期第 3 天时达到呼吸高峰之后开始下降,

采后强烈的呼吸代谢,加速了双孢蘑菇体内的酶促褐变^[30]。而后者褐变的程度是其品质变化的决定性因素,也是消费者购买的重要选择因素,从图 4b、4c 中可以看出,在双孢蘑菇采后品质变化过程中白度和褐变指数呈相反的变化趋势。其中在预冷及冷链运输过程中变化不显著,变化主要在超市低温货架期。

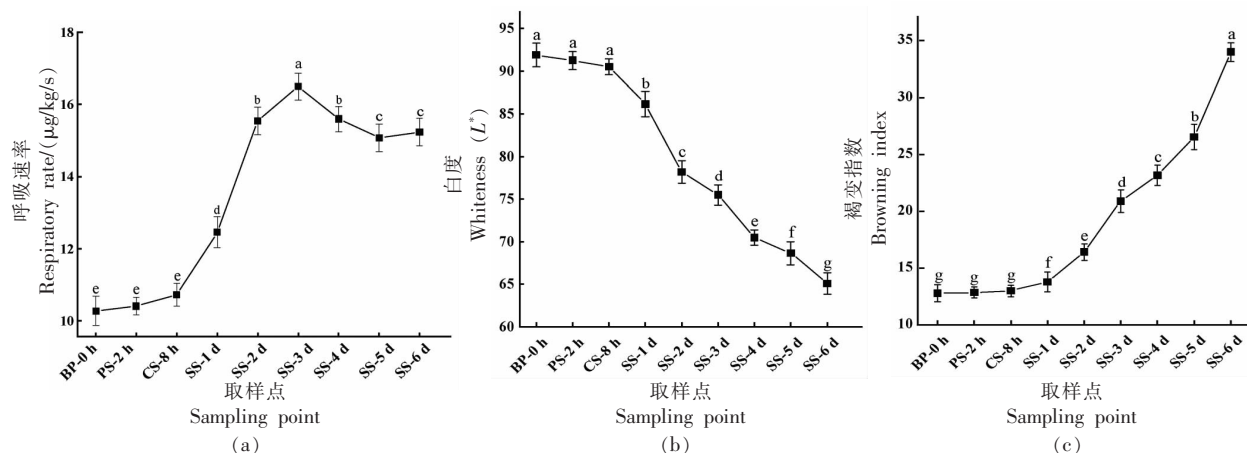


图4 双孢蘑菇采后冷链流通过程中呼吸强度(a)白度(b)和褐变指数(c)变化

Fig.4 Changes in respiration rate (a), whiteness (b) and browning index (c) of *A. bisporus* during postharvest cold chain circulation

2.4 冷链流通过程中双孢蘑菇游离氨基酸总量的变化

游离氨基酸的含量也常被作为非酶促褐变的重要评价指标,可以充分反映双孢蘑菇子实体采后品质的劣变程度^[31]。基于此,对双孢蘑菇中6种

具有褐变活性的游离氨基酸含量进行分析。从表2可以看出采后不同贮藏时期游离氨基酸总量(FAA)呈上升的趋势,在第0,3,6d分别为19.15,19.60,20.12 µg/g。

表2 双孢蘑菇采后冷链流通过程中游离氨基酸含量变化(µg/g)

Table 2 Changes of free amino acids content in *A. bisporus* during postharvest cold chain circulation (µg/g)

游离氨基酸	0 d	3 d	6 d
赖氨酸(Lys)	1.55 ± 0.07 ^a	1.85 ± 0.03 ^a	2.03 ± 0.08 ^b
色氨酸(Trp)	3.64 ± 0.08 ^b	0.28 ± 0.03 ^a	0.12 ± 0.01 ^a
酪氨酸(Tyr)	3.30 ± 0.09 ^c	2.01 ± 0.05 ^b	1.00 ± 0.07 ^a
天冬氨酸(Asp)	1.60 ± 0.04 ^a	3.31 ± 0.12 ^c	2.15 ± 0.08 ^b
谷氨酸(Glu)	9.03 ± 0.16 ^a	12.10 ± 0.27 ^b	14.82 ± 0.31 ^c
半胱氨酸(Cys)	0.03 ± 0.00 ^a	0.05 ± 0.02 ^b	—
合计	19.15 ± 3.17 ^a	19.60 ± 2.86 ^b	20.12 ± 3.07 ^c

注:表中数据均为平均值±标准偏差,表中“—”代表未检出,不同的小写字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

2.5 冷链流通过程中双孢蘑菇相对电导率和MDA含量的变化

电解质泄漏与菇体内组织膜结构的完整性密切相关。如图5a所示双孢蘑菇菇体内相对电导率在整个冷链流通过程中,表现为在预冷及其冷链运输过程中变化不显著,在模拟超市低温货架期贮藏前3d上升较为缓慢,而后迅速升高。这可能因为双孢蘑的细胞在贮藏过程中被破坏,从而造成膜通透性减弱,大量成分在此情况下迅速进入导致电解质泄露^[30]。MDA是果蔬采后品质变化过

程中膜脂过氧化的重要中间产物,其含量的变化与细胞膜结构损伤和组织衰老的程度呈正相关^[32]。由图5b可知,在双孢蘑菇整个冷链流通过程中MDA含量呈现上升趋势,其中在预冷及其冷链运输到目的地过程中变化不显著,在模拟超市低温货架贮藏期呈现显著上升,在第3天时,MDA含量达到了2.34 mmol/kg,之后迅速升高。

2.6 冷链流通过程中双孢蘑菇可溶性固形物、总酚含量和总抗氧化能力的变化

双孢蘑菇中可溶性固形物的含量是其采后呼

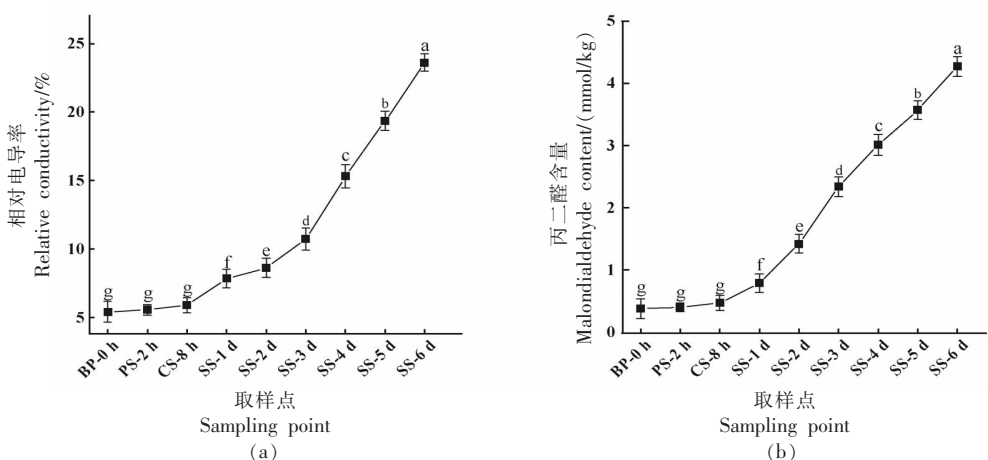


图 5 双孢蘑菇采后冷链流通过程中相对电导率(a)和丙二醛(b)含量的变化
 Fig.5 Changes in relative conductivity (a) and malondialdehyde content(b) of *A. bisporus* during the postharvest cold chain circulation

吸代谢所需营养物质的重要组成部分，也是衡量双孢蘑菇营养品质及反映其品质变化的重要指标^[33]。由图 6a 可知，可溶性固形物在整个冷链流通过程中呈下降趋势，但在预冷及其冷链运输途中变化不显著。酚类物质常被作为双孢蘑菇采后酶促褐变的主要因素^[34]，由图 6b 可知，双孢蘑菇采后整个冷链流通过程中酚类物质含量的变化呈

先升后降的趋势。因此对双孢蘑菇采后品质变化过程中酚类物质含量变化规律的研究对调控双孢蘑菇采后的褐变有重要意义。如图 6c 所示，在整个贮藏过程中，总抗氧化能力呈现显著下降趋势。贮藏第 3 天，总抗氧化能力 10 U/g，较新鲜双孢蘑菇总抗氧化能力降低了 70.65%。在模拟超市低温货架贮藏期间均表现为显著上升或下降。

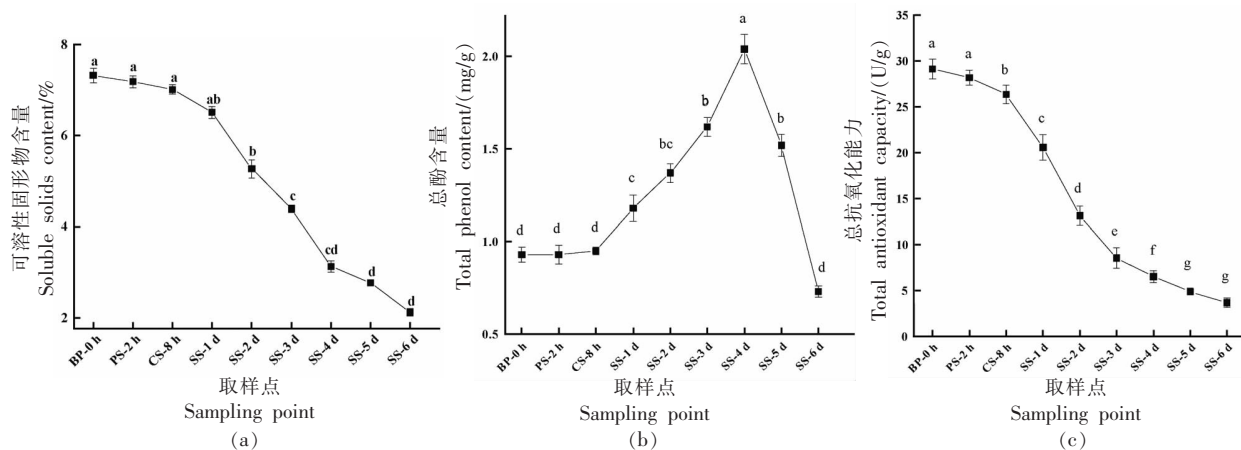


图 6 双孢蘑菇采后冷链流通过程中可溶性固形物、总酚含量和总抗氧化能力的变化
 Fig.6 Changes in soluble solids content (a) total phenol content (b) and total antioxidant capacity (c) of *A. bisporus* during the postharvest cold chain circulation

2.7 冷链流通过程中双孢蘑菇活性氧(ROS)变化

双孢蘑菇在采后冷链流通过程中，正常的生理代谢平衡遭到破坏失调，子实体内 $O_2\cdot^-$ 和 H_2O_2 含量的迅速积累是一种典型的氧化应激反应，致

活性氧自由基 ROS($O_2\cdot^-$ 和 H_2O_2)大量积累加剧双孢蘑菇的氧损伤和品质劣变^[35]。由表 3 可知，双孢蘑菇采后冷链流通过程中，伴随着品质变化子实体内的 $O_2\cdot^-$ 和 H_2O_2 含量呈持续上升的趋势，主要

发生在低温货架贮藏期间。双孢蘑菇采后体内活性氧的含量迅速升高,加速了双孢蘑菇采后品质变化。

2.8 冷链流通过程中活性氧代谢相关酶活性的变化

多酚氧化酶(PPO)能把酚类物质氧化成醌和水,醌再经非酶促聚合,形成褐色物质,促使双孢蘑菇发生褐变^[36]。过氧化物酶(POD)在H₂O₂存在条件下能迅速氧化多酚物质,与PPO协同作用引起果蔬褐变,也有研究表明,POD在植物细胞中起保护酶作用,其直接参与清除活性氧(H₂O₂)和木质化过程,并表现出抗氧化性能^[37-38]。抗氧化酶的活性在维持果蔬体内活性氧的平衡中起着重要作用,其中过氧化氢酶(CAT)能将H₂O₂分解成H₂O

和O₂,防止果蔬组织中的H₂O₂积累;超氧化物歧化酶(SOD)因具有清除细胞中的活性氧,维持活性氧代谢平衡,保护膜结构而被认为是延缓品质劣变的关键酶^[39]。由表3可知,双孢蘑菇采后冷链流通过程中子实体内PPO活性呈先升后降的变化趋势,与第0小时相比,在第3天时其活性显著升高;双孢蘑菇采后品质变化过程中,POD活性在前3d活性升高缓慢,随后POD活性快速升高。由表3可知,双孢蘑菇采后品质变化过程中子实体内的SOD、CAT活性呈持续升高的变化趋势。在整个冷链流通过程中,均表现为在预冷及其冷链运输途中变化不显著,在模拟超市低温货架贮藏时期呈显著变化。

表3 双孢蘑菇采后冷链流通过程中O₂·⁻、H₂O₂含量和代谢酶活性的变化

Table 3 Changes of O₂·⁻, H₂O₂ content and metabolic enzyme activity of *A. bisporus* during postharvest cold chain circulation

取样点	PPO/(U/mg pro)	POD/(U/mg pro)	O ₂ · ⁻ /(mmol/min/g)	H ₂ O ₂ /(μmol/g)	SOD/(U/mg pro)	CAT/(U/mg pro)
BP-0 h	36.30 ± 1.32 ^a	18.40 ± 1.01 ^a	3.23 ± 0.09 ^a	26.83 ± 0.91 ^a	156.19 ± 12.08 ^a	3.83 ± 0.91 ^{ab}
PS-2 h	36.90 ± 1.44 ^a	19.10 ± 1.33 ^a	3.27 ± 0.06 ^a	28.03 ± 1.07 ^a	165.42 ± 9.32 ^a	3.70 ± 0.52 ^a
CS-6 h	38.30 ± 1.24 ^a	20.54 ± 1.21 ^a	3.35 ± 0.10 ^a	29.32 ± 0.99 ^a	179.57 ± 10.01 ^a	3.55 ± 0.73 ^a
SS-1 d	41.50 ± 1.46 ^b	25.20 ± 1.23 ^b	3.57 ± 0.10 ^{ab}	37.56 ± 1.70 ^c	239.76 ± 10.59 ^b	3.36 ± 1.07 ^a
SS-2 d	47.50 ± 1.37 ^c	33.41 ± 1.21 ^c	3.97 ± 0.11 ^b	34.85 ± 0.88 ^b	259.27 ± 8.08 ^b	4.85 ± 0.88 ^b
SS-3 d	53.60 ± 1.25 ^d	43.47 ± 1.32 ^d	4.43 ± 0.08 ^c	40.13 ± 1.17 ^d	327.13 ± 7.49 ^f	6.83 ± 1.17 ^{bc}
SS-4 d	55.20 ± 1.35 ^e	48.81 ± 1.08 ^e	4.62 ± 0.07 ^d	42.78 ± 1.29 ^d	301.83 ± 10.71 ^e	7.08 ± 1.09 ^c
SS-5 d	59.11 ± 1.46 ^f	51.27 ± 1.17 ^f	4.97 ± 0.10 ^e	45.07 ± 0.58 ^e	281.49 ± 9.84 ^{cd}	8.57 ± 0.58 ^{cd}
SS-6 d	56.40 ± 1.25 ^e	53.83 ± 0.91 ^f	4.93 ± 0.08 ^e	48.49 ± 0.87 ^f	268.19 ± 10.57 ^e	9.49 ± 0.87 ^e

注:表中不同小写字母表示Duncan检验有显著性差异($P < 0.05$)。

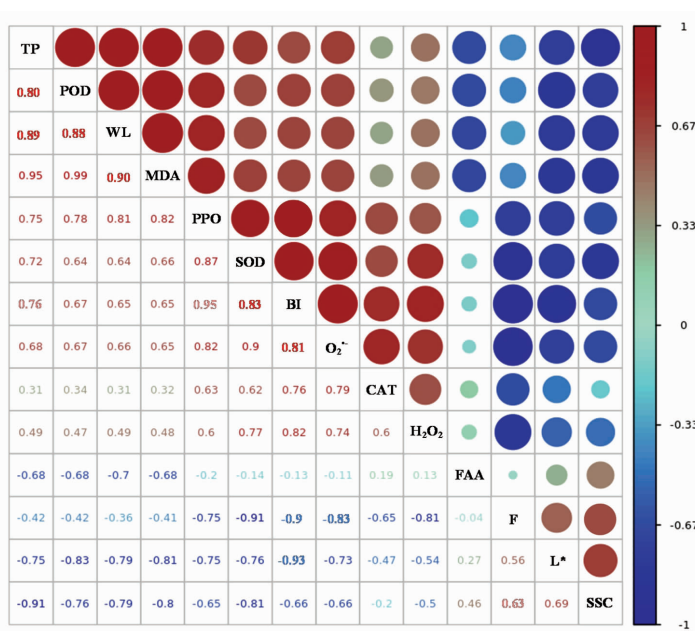
2.9 冷链流通过程中双孢蘑菇品质指标与生理指标之间的相关性分析

由图7可知,Pearson相关分析显示,双孢蘑菇采后品质变化过程中品质指标和生理指标变化之间存在正相关和负相关。双孢蘑菇采后品质变化过程中褐变是最具有代表性的特征之一,我们通过Pearson相关分析发现BI与TP、MDA、O₂·⁻、H₂O₂、含量变化以及POD、PPO、SOD活性变化呈正相关,其中BI与PPO活性相关性最强($R^2=0.95$),而且BI与TP含量显著相关($R^2=0.76$),这与Ye等^[40]研究结果的一致,因此可以说明PPO活性的变化与TP含量的变化在双孢蘑菇采后褐变过程

中起着重要作用。通过Pearson相关分析我们发现BI与SSC含量的变化显著负相关($R^2=-0.66$),表明双孢蘑菇采后褐变过程伴随着营养物质的损失;失重率与丙二醛含量变化有很强的相关性($P < 0.05$)。

3 讨论

本文通过对双孢蘑菇子实体在模拟冷链流通贮藏过程的感官品质、主要生理指标及活性氧代谢情况研究表明,冷链流通过程中其感官品质和生理指标发生了一系列变化,包括失水萎蔫、褐变、质地软化、营养物质的分解代谢、以及内在的



注:相关系数与右上角圆圈的大小和颜色强度成正比;在左下角,相关系数与数值大小和颜色强度成比例,红色为正相关,蓝色为负相关;皮尔逊的相关矩阵分析是通过 genescloud (<https://www.genescloud.cn>) 工具进行的。

图 7 Pearson 之间的相关矩阵 CAT, SOD, BI, O₂^{·-}, H₂O₂, PPO, TP, WL, POD, MDA, F, L*, SSC 和 FAA

Fig.7 Pearson's correlation matrix between CAT, SOD, BI, O₂^{·-}, H₂O₂, PPO, TP, WL, POD, MDA, F (Firmness), L*, SSC and FAA

抗氧化酶系活性的变化,它们共同构成了一个紧密协调的复杂体系来共同影响双孢蘑菇采后流通过程中品质劣变。总体而言,冷链流通过程中,双孢蘑菇在预冷及 4~6 h 冷链运输过程中品质变化不大,而在模拟超市低温货架期温度(12℃±1℃)贮藏期间品质出现劣变。

双孢蘑菇采后品质变化是一个菇体自身消耗(营养成分损失和品质变化)且不可逆的过程,其机体内部会引发一系列的品质和生理变化^[34],其中 ROS 等物质在采后的贮藏过程中积累造成的氧化损伤是品质变化的重要原因^[41]。当 ROS 由于贮藏时间延长而在细胞内积累时,其过量的 ROS 积累会攻击蛋白质,形成氧化损伤、细胞凋亡,导致双孢蘑菇采后贮藏品质和适销性降低^[6]。同时,为防止细胞发生氧化、凋亡,双孢蘑菇机体内部的抗氧化系统启动,并清除活性氧等物质^[20]。但在采后贮藏过程中,由于双孢蘑菇体外呼吸作用的减弱,活性氧在受损的细胞内不断增强,同时伴随着抗氧化酶活性的降低,其清除活性氧的能力下降,从而导致大量 ROS 在细胞内积累,破坏

细胞膜,最终造成品质劣变。因此控制活性氧的积累,调节细胞的代谢水平,是延缓双孢蘑菇采后品质劣变最需要解决的问题。

我们试验发现,双孢蘑菇的品质变化与生理指标具有显著相关性。其中,双孢蘑菇在采后整个冷链流通过程中总酚含量呈先升后降的趋势,而 MDA 和 ROS(O₂^{·-}和 H₂O₂)含量呈持续上升的趋势。酚类物质、MDA 和 ROS 是菇体在贮藏环境中应激反应需要及产生的物质,酚类物质作为酶促褐变的底物,其含量的上升可加深膜脂过氧化程度,使 ROS 的含量积累显著增加,从而引发组织褐变。在菇体内 ROS 是呼吸代谢不可避免产物,正常条件的低浓度 ROS 可刺激机体的免疫系统,形成信号分子^[42],对细胞起到防御功能。但当菇体环境发生变化,机体内的平衡失调使 ROS 会大量积累,则会激活或诱导细胞破裂及劣变基因的表达,进而加速菇体采后的品质变化^[43-44]。因此,双孢蘑菇采后品质变化与细胞膜的相对透性及活性氧代谢密切相关,MDA 是衡量细胞膜脂的不饱和度的重要指标,前者含量的增加会引起膜的通透性

增加,导致活性氧自由基累积,造成细胞膜系统的损伤,加快菇体采后贮藏期间品质的变化。

双孢蘑菇采后品质变化过程中菇体内 SOD、POD 和 CAT 活性呈持续升高的变化趋势。而 SOD、POD 和 CAT 作为双孢蘑菇子实体内活性氧防御系统的主要酶系统,它们活性的升高可以起到抗氧化、清除 ROS 的作用,从而延缓品质劣变^[36,45]。这几种酶活性的升高可能是由于菇体内活性氧代谢的增强,诱导其活性的增加,使其含量的迅速升高。因此,在双孢蘑菇采后保鲜中开发能提高抗氧化酶活性的处理方式,对有效抑制膜脂氧化和缓解双孢蘑菇子实体中活性氧的积累,从而延缓氧化损伤,对保持双孢蘑菇采后贮藏过程中品质变化具有非常重要的意义。

采后双孢蘑菇子实体的温度较高,在常温下品质劣变速率较快。通过预冷可将温度快速降低到所需储藏的温度,可以有效降低双孢蘑菇采后的呼吸和新陈代谢速率,对品质的保持有着重要的作用^[46]。我们的研究表明,冷链流通过程中,双孢蘑菇在预冷及冷链运输过程中品质变化不大。关于低温贮藏的研究很多,Arjun 等^[47]研究表明,获的蘑菇在室温下的保质期约为 3~4 d,在冷藏储存下的保质期约为 8~9 d。本研究也表明低温贮藏可以降低品质劣变,延长货架期。

本文仅研究了本省范围内 4~6 h 车程,销售半径 200~300 km 之内的冷链流通情况,更远途径(>300 km)的冷链流通情况可能会在流通过程中发生品质劣变,尚待进一步研究。

4 结论

相关性分析表明,褐变指数与失重率、总酚含量、丙二醛、多酚氧化酶、过氧化物酶和超氧化物歧化酶活性呈正相关,其中褐变指数与多酚氧化酶的相关性最强,褐变指数与总酚含量显著相关,说明多酚氧化酶活性的变化与总酚含量的变化对双孢蘑菇冷链流通过程中的褐变起着重要作用。双孢蘑菇采后冷链流通过程中 $O_2\cdot^-$ 和 H_2O_2 含量随着贮藏时间的延长呈上升趋势,而抗氧化酶中虽有些酶的活性呈上升的趋势,但总的抗氧化能力呈现下降的趋势,致使其不能及时清除组织细胞中的 ROS,使得脂质过氧化产物(丙二醛)含量

增加,从而造成菇体细胞膜系统的损害,加速了其采后贮藏期间品质的变化。综上,在双孢蘑菇冷链运输之前进行 2~4 h 预冷处理对于保持菇体的新鲜度和延长货架期至关重要;同时严格控制冷链流通过程中菇体水分的流失、MDA 和 ROS 的积累对于保持双孢蘑菇子实体的品质和延长货架期有着十分重要的意义。本研究获得的双孢蘑菇子实体品质变化与其生理指标间的变化规律,可为全方位更准确地预测双孢蘑菇货架期、以及实现采后冷链流通及其货架销售期间品质监测提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] SIWULSKI M, BUDKA A, RZYMSKI P, et al. Worldwide basket survey of multielemental composition of white button mushroom *Agaricus bisporus*[J]. Chemosphere, 2020, 239: 124718.
- [2] CAI M, ZHONG H, MA Q, et al. Physicochemical and microbial quality of *Agaricus bisporus* packaged in nano-SiO₂/TiO₂ loaded polyvinyl alcohol films[J]. Food Control, 2022, 131: 108452.
- [3] QU T, LI B, HUANG X, et al. Effect of peppermint oil on the storage quality of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. Food Bioprocess Technology, 2020, 13: 404-418.
- [4] WANG T, YUN J, ZHANG Y, et al. Effects of ozone fumigation combined with nano-film packaging on the postharvest storage quality and antioxidant capacity of button mushrooms (*Agaricus bisporus*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 176: 111501.
- [5] NI X, YU J, SHAO P, et al. Preservation of *Agaricus bisporus* freshness with using innovative ethylene manipulating active packaging paper [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128757.
- [6] WALKOWIAK -TOMCZAK D, IDASZEWSKA N, BIE?CZAK K, et al. The effect of mechanical actions occurring during transport on physicochemical changes in *Agaricus bisporus* mushrooms[J]. Sustainability, 2020, 12(12): 4993.
- [7] AGUIRRE L, FRIAS J M, BARRY-RYAN C, et al. Modelling browning and brown spotting of mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored in controlled envi-

- ronmental conditions using image analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 280–286.
- [8] VERMA A K, SHIVANI P C S, KUMAR M, et al. Processing of mushrooms: A viable option to sustain the growing population of the developing countries[J]. International Journal of Chemical Studies, 2020, 8(3): 1416–1423.
- [9] FENG L, JIANG X, KITAZAWA H, et al. Characterization of bioactive films loaded with melatonin and regulation of postharvest ROS scavenging and ascorbate–glutathione cycle in *Agaricus bisporus* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 194: 112107.
- [10] LIU J, LIU S, ZHANG X, et al. Effect of gallic acid grafted chitosan film packaging on the postharvest quality of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 147: 39–47.
- [11] SHARMA P, JHA A B, DUBEY R S, et al. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions[J]. Journal of Botany, 2012, 2012(1): 217037.
- [12] SHEKARI A, HASSANI R N, AGHDAM M S. Exogenous application of GABA retards cap browning in *Agaricus bisporus* and its possible mechanism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 174: 111434.
- [13] LIN Q, LU Y, ZHANG J, et al. Effects of high CO₂ in–package treatment on flavor, quality and antioxidant activity of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during postharvest storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 123: 112–118.
- [14] DUAN J, WU R, STRIK B C, et al. Effect of edible coatings on the quality of fresh blueberries (Duke and Elliott) under commercial storage conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59(1): 71–79.
- [15] KOTWALIWALE N, BAKANE P, VERMA A. Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1207–1211.
- [16] GAO M, FENG L, JIANG T. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment [J]. Food Chemistry, 2014, 149: 107–113.
- [17] FERNANDES Â, ANTONIO A L, BARREIRA J C M, et al. Effects of gamma irradiation on physical parameters of *Lactarius deliciosus* wild edible mushrooms[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 74: 79–84.
- [18] GONG D, BI Y, JIANG H, et al. A comparison of postharvest physiology, quality and volatile compounds of ‘Fuji’ and ‘Delicious’ apples inoculated with *Penicillium expansum* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 150: 95–104.
- [19] 马宁, 王超璠, 方东路, 等. 聚乙烯膜包装金针菇冷藏期间的风味变化规律[J]. 中国农业科学, 2019, 52(8): 1435–1448.
- MA N, WANG C F, FANG D L, et al. Flavor variation of *Flammulina velutipes* in polyethylene film packaging during the cold storage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(8): 1435–1448.
- [20] DUAN X, LIU T, ZHANG D, et al. Effect of pure oxygen atmosphere on antioxidant enzyme and antioxidant activity of harvested litchi fruit during storage[J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1905–1911.
- [21] FATTAHIFAR E, BARZEGAR M, GAVLIGHI H A, et al. Evaluation of the inhibitory effect of pistachio (*Pistacia vera* L.) green hull aqueous extract on mushroom tyrosinase activity and its application as a button mushroom postharvest anti–browning agent[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 145: 157–165.
- [22] WU Y, HU Q, LI Z, et al. Effect of nanocomposite–based packaging on microstructure and energy metabolism of *Agaricus bisporus* [J]. Food Chemistry, 2019, 276: 790–796.
- [23] YAO W, XU T, FAROOQ S U, et al. Glycine betaine treatment alleviates chilling injury in zucchini fruit (*Cucurbita pepo* L.) by modulating antioxidant enzymes and membrane fatty acid metabolism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 144: 20–28.
- [24] ZHANG Z, HUBER D J, QU H, et al. Enzymatic browning and antioxidant activities in harvested litchi fruit as influenced by apple polyphenols [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 191–199.
- [25] 孟德梅, 申琳, 陆军, 等. 双孢菇采后感官品质变化的因素分析与保鲜技术研究进展[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 283–287.

- MENG D M, SHEN L, LU J, et al. Research progress in analysis of factors affecting sensory quality and preservation techniques for post-harvested *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2010, 31(15): 283-287.
- [26] 任浩, 于官楚, 孙炳新, 等. 食用菌贮藏保鲜技术研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 1-11.
- REN H, YU G C, SUN B X, et al. Research advances on the storage and preservation of edible fungi[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 1-11.
- [27] ZHANG K, PU Y, SUN D. Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 72-82.
- [28] SRIVASTAVA P, PRAKASH P, BUNKAR D S. Enhancement in physiological and sensory attributes of button mushroom (*Agaricus bisporus*) as influenced by chemical and modified atmospheric packaging (MAP) treatments at low temperature storage [J]. International Journal of Chemical Studies, 2020, 8(2): 2059-2064.
- [29] OLIVEIRA F, SOUSA-GALLAGHER M J, MAHAJAN P V, et al. Development of shelf-life kinetic model for modified atmosphere packaging of fresh sliced mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 466-473.
- [30] 许小璐, 刘静, 邓冰, 等. 短波紫外线处理对采后香菇褐变的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(5): 1129-1135.
- XU X L, LIU J, DENG B, et al. Effects of short-wave ultraviolet treatment on the browning of postharvest *Lentinula edodes*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(5): 1129-1135.
- [31] WANG Q, DING T, ZUO J, et al. Amelioration of postharvest chilling injury in sweet pepper by glycine betaine[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 112: 114-120.
- [32] ZHOU R, LI Y, YAN L, et al. Effect of edible coatings on enzymes, cell-membrane integrity, and cell-wall constituents in relation to brittleness and firmness of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) during storage[J]. Food Chemistry, 2011, 124(2): 569-575.
- [33] 刘战丽, 王相友, 朱继英, 等. 高氧气调贮藏下双孢蘑菇品质和抗性物质变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 362-366.
- LIU Z L, WANG X Y, ZHU J Y, et al. Effects of high oxygen atmosphere on quality and resistant substance of mushroom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 362-366.
- [34] 孙若兰, 肖靓, 易有金, 等. 双孢蘑菇采后贮藏保鲜研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 333-340.
- SUN R L, XIAO L, YI Y J, et al. Progress in techniques for postharvest quality preservation of *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2021, 42(1): 333-340.
- [35] 史轲轲. 双孢菇采后衰老过程中抗氧化系统及鲜味的调控研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 21-22.
- SHI K K. Regulation on the antioxidant system and the umami of the postharvest *Agaricus bisporus* during the senescence process[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019: 21-22.
- [36] 高伦江, 曾小峰, 曾顺德, 等. 苯并噻重氮结合不同包装材料对金针菇贮藏品质及酶活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(6): 180-184, 192.
- GAO L J, ZENG X F, ZENG S D, et al. Effects of benzothiazole combined with different packaging materials on storage quality and enzyme activity of *Flammulina velutipes*[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(6): 180-184, 192.
- [37] QIN Y, LIU D, WU Y, et al. Effect of PLA/PCL/cinnamaldehyde antimicrobial packaging on physicochemical and microbial quality of button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 73-79.
- [38] SACHADYN-KRÓL M, MATERSKA M, CHILCZUK B, et al. Ozone-induced changes in the content of bioactive compounds and enzyme activity during storage of pepper fruits[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 59-67.
- [39] 钱霄晨, 蔺凯丽, 黄琦, 等. 肉桂醛熏蒸处理对香菇采后抗氧化能力及多胺的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 263-269.
- QIAN X C, LIN K L, HUANG Q, et al. Effect of cinnamaldehyde fumigation on antioxidant capacity and polyamines in shiitake mushroom[J]. Food Science, 2019, 40(17): 263-269.
- [40] YE J, LI J, HAN X, et al. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of

- shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) Stored at Cold Storage[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(3): 474–482.
- [41] WANG Y, MO Y, LI D, et al. The main factors inducing postharvest lignification in king oyster mushrooms (*Pleurotus eryngii*): Wounding and ROS-mediated senescence[J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125224.
- [42] JIANG T, ZHENG X, LI J, et al. Integrated application of nitric oxide and modified atmosphere packaging to improve quality retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Chemistry, 2011, 126(4): 1693–1699.
- [43] CHU W, GAO H, CHEN H, et al. Effects of cuticular wax on the postharvest quality of blueberry fruit[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 68–74.
- [44] LIN Y, LIN H, LIN Y, et al. The roles of metabolism of membrane lipids and phenolics in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested longan fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 53–61.
- [45] 田平平, 王杰, 秦晓艺, 等. 采后处理对杏鲍菇贮藏品质及抗氧化酶系统的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 941–951.
- TIAN P P, WANG J, QIN X Y, et al. Effect of postharvest treatment on the storage quality and antioxidant enzyme system of *Pleurotus eryngii*[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(5): 941–951.
- [46] 付艳武, 高丽朴, 王清, 等. 蔬菜预冷技术的研究现状[J]. 保鲜与加工, 2015, 15(1): 58–63.
- FU Y W, GAO L P, WANG Q, et al. Research status on precooling techniques of vegetables [J]. Storage and Process, 2015, 15(1): 58–63.
- [47] ARJUN A D, CHAKRABORTY S K, MAHANTI N K, et al. Non-destructive assessment of quality parameters of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) using image processing techniques[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 59: 2047–2059.

The Quality Deterioration and Reactive Oxygen Metabolism of *Agaricus bisporus* during Cold Chain Circulation

Wang Biao¹, Wang Ting², Yun Jianmin^{1*}, Li Wenhui¹, Guo Gengxin¹, Qu Yuling¹

¹College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070

²Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, Xinjiang)

Abstract To investigate the quality deterioration of mushrooms (*Agaricus bisporus*) and the law of their reactive oxygen metabolism during cold chain circulation. In this experiment, the sensory quality, main physiological indicators and reactive oxygen metabolism of *A. bisporus* fruiting bodies were dynamically measured during post-harvest pre-cooling, cold chain transportation and simulated low temperature shelf life, and the correlation between quality deterioration and physiological indicators and reactive oxygen metabolism was investigated by Pearson correlation analysis software. The results showed that the quality of *A. bisporus* did not change much during the period of pre-cooling and cold chain transportation during cold chain circulation, while gradual quality deterioration occurred during storage in simulated supermarket low temperature shelf life (12 °C±1 °C). The respiratory peak appeared at the 3rd day, and after the respiratory peak, its sensory quality decreased rapidly, mainly manifested as wilting, browning, opening, and texture softening, etc. At the same time, the physiological indexes also changed significantly, as shown by the decrease of soluble solid content (SSC), total antioxidant capacity (T-AOC), and the dynamic increase in relative conductivity (RC), the contents of total phenol (TP), malondialdehyde (MDA), O₂^{·-}, and H₂O₂, and the activities of enzymes related to active oxygen (ROS) metabolism. Pearson correlation analysis revealed that postharvest browning of mushrooms was significantly correlated with changes in polyphenol oxidase (PPO) activity, total phenol content, and malondialdehyde content, and browning was influenced by changes in PPO, peroxidase (POD), and superoxide dismutase activities (SOD) and phenolic content. The highest correlation was found between browning and PPO ($R^2=0.95$); there was a strong correlation be-

tween weight loss (WL) and changes in malondialdehyde content ($R^2=0.90$). The ROS contents accumulated with the extension of storage time, although the activities of PPO showed an increasing trend, but the total antioxidant capacity of the antioxidant enzyme system was decreasing, which led to the accelerated deterioration of storage quality. According to these laws, the shelf life of *A. bisporus* can be predicted more accurately and provide some theoretical guidance for mushroom post-harvest cold chain circulation and quality monitoring during shelf sales.

Keywords *Agaricus bisporus*; cold chain circulation; quality deterioration; correlation analysis; physiological changes; reactive oxygen metabolism