

## $\epsilon$ -聚赖氨酸盐酸盐对贮藏期间双孢蘑菇表面微生物生长和保鲜的影响

魏奇<sup>1,2</sup>, 李婕<sup>2</sup>, 刘蓓蓓<sup>2</sup>, 罗小芳<sup>2</sup>, 方婷<sup>2</sup>, 陈炳智<sup>2</sup>, 江玉姬<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> 宁德师范学院生命科学学院 福建宁德 352100

<sup>2</sup> 福建农林大学食品科学学院 福州 350002

**摘要** 以延长双孢蘑菇货架期为目标,考察不同温度(4,16,25℃)条件下,不同质量浓度(0.15和0.30g/L)的 $\epsilon$ -聚赖氨酸盐酸盐( $\epsilon$ -PL)对采后双孢蘑菇表面背景菌群及假单胞菌生长的影响,建立货架期预测模型。贮藏期间,分析感官评分、白度评价、硬度评价、失重率及水分含量等指标的变化,研究 $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇的保鲜性能。结果表明:4,16和25℃时,双孢蘑菇在不同质量浓度的 $\epsilon$ -PL(0.15和0.30g/L)作用下,背景菌群及假单胞菌的生长曲线分为3个阶段(迟缓期、对数期和稳定期)。在4℃条件下, $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇表面假单胞菌生长有抑制作用,质量浓度为0.30g/L的 $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇表面假单胞菌生长抑制作用最佳,对双孢蘑菇的保鲜性能最优。

**关键词** 双孢蘑菇;  $\epsilon$ -聚赖氨酸盐酸盐; 背景菌群; 假单胞菌; 预测模型

**文章编号** 1009-7848(2022)03-0256-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.03.028

双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*),俗称纽扣蘑菇或白蘑菇,是一种高蛋白、低脂肪的食用菌,因味道鲜美、营养丰富而倍受各国人们的青睐。然而,采收后的双孢蘑菇含水量较高(90%),组织结构柔软,呼吸强度高,仍然有强烈的生理代谢活动。双孢蘑菇在环境因素和微生物的作用下,比较容易发生色泽和风味的改变。双孢蘑菇的质地柔嫩,在贮运和市场销售过程中也更加容易受到机械损伤,从而导致双孢蘑菇产生褐变和腐烂,不利于长期贮存<sup>[1]</sup>。

$\epsilon$ -聚赖氨酸盐酸盐( $\epsilon$ -PL)这种功能性多肽由多个赖氨酸残基聚合而成,主要从链霉菌属的代谢产物中获得。较多文献报道: $\epsilon$ -PL具有广谱抑菌的特性,对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和沙门氏菌等具有抑制作用<sup>[2]</sup>。 $\epsilon$ -PL作为天然防腐抑菌剂,对人体安全无毒,在食品中应用具有良好的前景。早在2003年,FDA就批准 $\epsilon$ -PL为安全食品保鲜剂,我国于2014年批准 $\epsilon$ -PL用于蔬果保鲜<sup>[3]</sup>。目前有关 $\epsilon$ -PL对食用菌的保鲜研究较少。预测微生物学模型是一种快速、高效的评估微生物生长

潜力或预测特定条件下微生物生长的方法,被认为是评估产品货架期和食品安全的重要工具,以执行危害分析并设置关键控制点,进一步制定风险评估计划<sup>[4]</sup>。在食品加工和储存过程中,预测微生物学模型可以用于描述致病或腐败微生物的生长行为,其中,时间是重要的参数之一<sup>[5]</sup>。

目前,双孢蘑菇常用的保鲜方法是低温贮藏。本课题组前期研究双孢蘑菇表面微生物群落的动态变化和优势腐败菌,发现双孢蘑菇表面主要的腐败微生物为假单胞菌<sup>[6]</sup>。假单胞菌是常见的腐败微生物,可通过引起双孢蘑菇褐变、斑点和腐败而显著降低其品质<sup>[7]</sup>。据报道,伞菌假单胞菌(*Pseudomonas agarici*)是引起双孢蘑菇表面斑点的主要因素<sup>[8]</sup>。Gill等<sup>[9]</sup>研究表明托拉斯假单胞菌(*Pseudomonas tolaasii*)会引起双孢蘑菇褐斑病。有文献<sup>[10]</sup>报道:4℃并不能完全抑制假单胞菌的生长繁殖,在食品冷藏条件下假单胞菌比其它腐败细菌的生长速率快,仅采用低温贮藏措施不能完全抑制双孢蘑菇表面假单胞菌的增长。双孢蘑菇在生产运输、贮藏销售的过程中,常被置于温度相对较高的环境下,加速了微生物的生长繁殖<sup>[11]</sup>。本研究利用低温结合 $\epsilon$ -PL,研究其对双孢蘑菇表面微生物生长的影响,建立货架期预测模型,为双孢蘑菇的保鲜提供理论依据。

收稿日期: 2021-03-08

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2021J05257)

作者简介: 魏奇(1991—),男,博士,讲师

通信作者: 江玉姬 E-mail: jyj1209@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 材料和试剂

试验所用的食用菌子实体(双孢蘑菇)由福建省漳州市同发食品工业有限公司提供。

细菌菌种:托拉斯假单胞菌(*Pseudomonas tolaasii*)、荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)、米氏假单胞菌(*Pseudomonas migulae*)和伞菌假单胞菌(*Pseudomonas agarici*)为双孢蘑菇表面分离得到<sup>[6]</sup>。

蛋白胨粉(Peptone),杭州微生物试剂有限公司;脑-心浸出液肉汤、胰蛋白胨大豆琼脂、假单胞菌CFC选择性培养基(CFC),青岛海博生物技术有限公司; $\epsilon$ -聚赖氨酸盐酸盐,浙江新银象生物工程有限公司。

### 1.2 仪器与设备

B-CYD2022L 无菌采样袋, 比克曼生物科技有限公司;MX-S 混匀仪,北京兴创实验仪器(北京)股份公司;JZ-1 拍击式均质机,拓赫机电科技(上海)有限公司;Megafuge 8 离心机,上海赛默飞世尔科技有限公司;MGC-100 光照培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;TMS-PRO 质构仪,美国FTC公司;ADCI-60-C 全自动测色色差计,北京辰泰克仪器技术有限公司;MB25 水分测定仪,奥豪斯有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 菌液的制备 4株假单胞混合菌液制备参考李长城<sup>[2]</sup>的方法,接种至双孢蘑菇的混合假单胞菌液浓度为 $10^7 \sim 10^8$  CFU/mL。

1.3.2 样品处理 选择外观洁白,大小一致,无褐变和机械损伤的新鲜双孢蘑菇。一部分用5 kGy剂量辐照处理,用来测定假单胞菌的生长情况;另一部分置于4℃条件下存放,用来测量背景菌的生长情况。在无菌条件下,将质量浓度为0.15 g/L和0.30 g/L的 $\epsilon$ -聚赖氨酸水溶液用喷雾器均匀地喷洒到菇体表面,自然晾干。用无菌均质袋将双孢蘑菇分装成质量约为25 g于无菌均质袋中,其中辐照组需将100  $\mu$ L假单胞菌混合菌悬液接种至双孢蘑菇样品中,最终双孢蘑菇样品中细菌浓度为4.0~5.0 lg(CFU/g),并在所有样品袋贴上标签。

1.3.3 培养与计数 参考彭亚博等<sup>[13]</sup>的方法。背景菌和假单胞菌菌数转化为以10为底的对数或自然对数。最终单位以lg(CFU/g)表示。

1.3.4 模型的建立 根据研究表明,采用修正的Gompertz模型对双孢蘑菇表面假单胞菌和背景菌群的生长曲线均具有良好的拟合精确度<sup>[6]</sup>。故本文继续采用修正的Gompertz模型拟合。表达式如下:

$$X(t) = X_0 + (X_{\max} - X_0) \exp \left\{ -\exp \left[ \frac{\mu_{\max} e}{X_{\max} - X_0} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $X(t)$ —— $t$ 时刻细菌的菌数,ln(CFU/g); $X_0$ ——细菌的初始菌数,ln(CFU/g); $X_{\max}$ ——细菌的稳定期菌数,ln(CFU/g); $\mu_{\max}$ ——比生长速率, $h^{-1}$ 。

1.3.5 感官评分 参照Lukasse等<sup>[14]</sup>进行感官评价的评定。感官评级表见表1。

表1 感官指标评价标准

Table 1 Standard of sensory properties

评分	色泽	质地	异味	开伞情况	是否发黏
8~10	色泽洁白,无褐变	弹性好	无	无	无
6~8	色泽稍暗,无褐变	较软	稍异味	轻度开伞	稍发黏
4~6	色泽偏暗,有褐变	明显软烂	明显异味	明显开伞	明显发黏
<4	色泽暗,严重褐变	严重软烂	严重异味	严重开伞	严重发黏

1.3.6 颜色的评价 通过ADCI-60-C全自动测色色差计测定双孢蘑菇盖的黑白度 $L^*$ 值,从而对双孢蘑菇的颜色进行评价。

1.3.7 硬度评价 采用SMSTA TA.XT plus质构仪测定双孢蘑菇的硬度。质构仪的设置参数如下:

P/2探头;100 g触发力;10%压缩比;1 mm·s<sup>-1</sup>测前速度;1 mm·s<sup>-1</sup>测中速度;10 mm·s<sup>-1</sup>测后速度。

1.3.8 失重率的测定 采用称量法测定双孢蘑菇的失重率。 $M_1$ 为贮藏前双孢蘑菇的质量,g; $M_2$ 为贮藏后双孢蘑菇的质量,g。

$$\text{失重率}(G) = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.9 水分含量的测定 将双孢蘑菇子实体去柄去菌褶,纵切成1 mm的薄片,称取1 g后采用水分测定仪测定水分含量。

1.3.10 统计学分析 背景菌及假单胞菌生长数据均采用美国农业部东部地区研究中心开发的预测微生物专用软件 IPMP2013(Integrated Pathogen Modeling Program)进行分析。采用 SPSS 16.0 软件进行显著性差异分析(Duncan法,显著水平  $P \leq$

0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度和 $\epsilon$ -PL 浓度对双孢蘑菇表面微生物生长曲线的影响

由图1可知,在4、16和25℃时,经过不同浓度的  $\epsilon$ -PL (0.15和0.30 g/L)处理,双孢蘑菇表面背景菌和假单胞菌的生长曲线有所不同。背景菌和假单胞菌的生长曲线呈现出完整的3个阶段,分别为:迟缓期、对数期和稳定期。双孢蘑菇表面

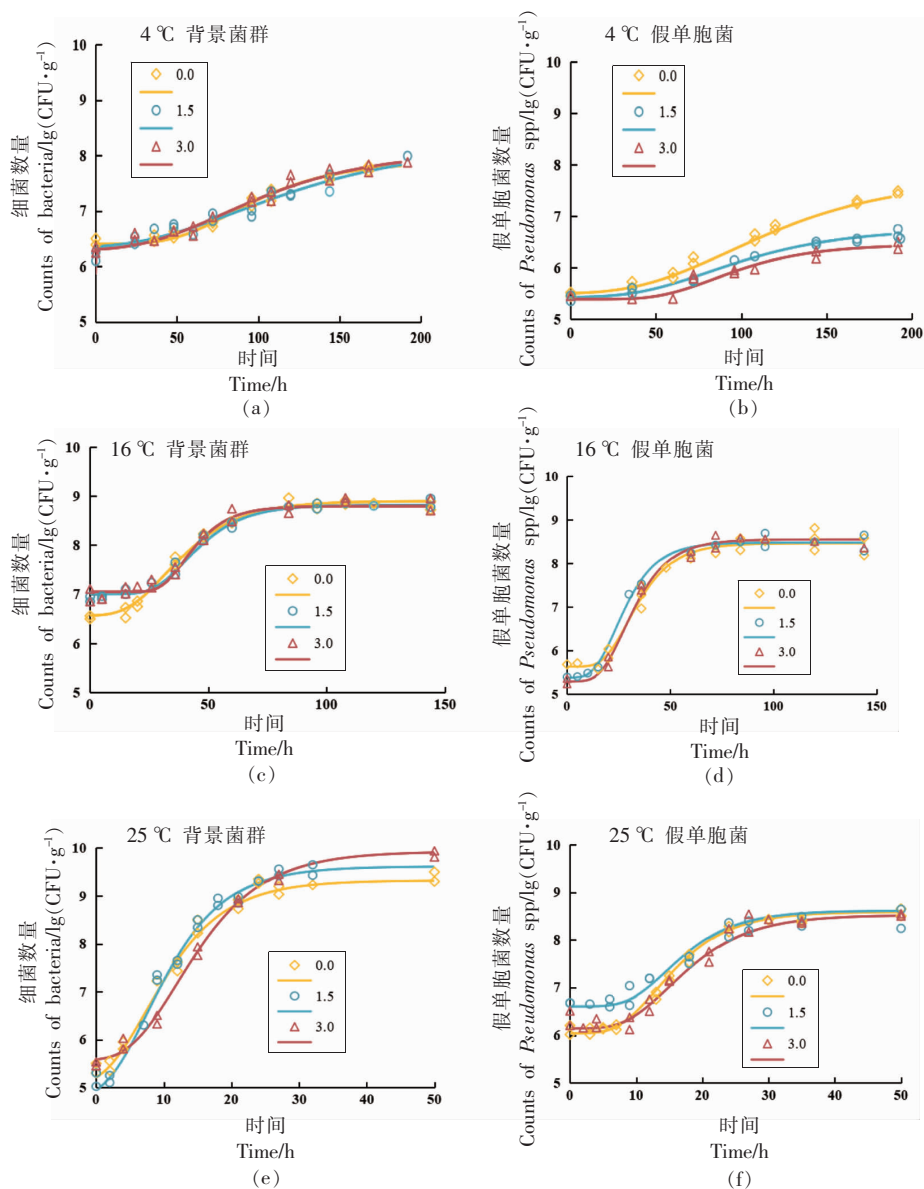


图1  $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇表面背景菌群及假单胞菌生长的影响

Fig.1 The effect the of growth of background microorganisms and *Pseudomonas* spp. on *Agaricus bisporus* treated with  $\epsilon$ -PL

背景菌群在稳定期的菌落数大于假单胞菌。温度和贮藏时间微生物的生长具有影响,低温贮藏则有利于抑制微生物的生长。在 16 和 25 °C 时, $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇表面背景菌群及假单胞菌生长无明显抑制作用。在 4 °C 条件下, $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇表面假单胞菌生长有抑制作用,质量浓度为 0.30 g/L 的  $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇表面假单胞菌生长抑制作用效果最佳。由此可知,低温条件和  $\epsilon$ -PL 协同作用对双孢蘑菇具有较好的保鲜作用。

## 2.2 温度和 $\epsilon$ -PL 浓度对双孢蘑菇表面微生物生长速率的影响

由表 2 可知,不同浓度的  $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇表面背景菌群生长速率影响不大。由图 2 可知,不同浓度  $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇表面背景菌群最大生长菌数无显著影响( $P>0.05$ )。4, 16 和 25 °C 时,最大生长菌数分别为 7.42, 8.35 和 8.65 lg(CFU/g)。在 4 °C 时,不同浓度  $\epsilon$ -PL 处理后的双孢蘑菇样品中假单胞菌最大生长菌数分别为 7.42, 6.60, 6.36 lg(CFU/g)。而 4 °C 条件下,添加 0.15 g/L 和 0.30 g/L 浓度  $\epsilon$ -PL 的双孢蘑菇样品中假单胞菌的比生长速率分别为 0.026 h<sup>-1</sup> 和 0.017 h<sup>-1</sup>, 明显低于对照组 0.035 h<sup>-1</sup>, 表明在 4 °C 条件下,质量浓度 0.15 g/L 和 0.30 g/L 的  $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇表面假单胞菌生长有抑制作用。

16 °C 时,不同浓度  $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇样品中假单胞菌最大生长菌数分别为 8.18, 8.28, 8.35 lg(CFU/g)。在 16 °C 条件下,添加 0.00, 0.15 和 0.30

表 2 温度和  $\epsilon$ -PL 浓度对双孢蘑菇表面背景菌群和假单胞菌生长速率影响

Table 2 Effects of temperature and concentrations of  $\epsilon$ -PL on the growth rate of background microorganisms and *Pseudomonas* spp. on *Agaricus bisporus*

温度 /°C	$\epsilon$ -PL 质量浓度 / g·L <sup>-1</sup>	背景菌 $\mu_{\max}/h^{-1}$	假单胞菌 $\mu_{\max}/h^{-1}$
4	0.00	0.035	0.035
	0.15	0.025	0.026
	0.30	0.030	0.017
16	0.00	0.117	0.200
	0.15	0.114	0.243
	0.30	0.145	0.233
25	0.00	0.366	0.569
	0.15	0.295	0.655
	0.30	0.304	0.523

g/L 质量浓度  $\epsilon$ -PL 的双孢蘑菇样品中假单胞菌的比生长速率分别: 0.200, 0.243 和 0.233 h<sup>-1</sup>,  $\epsilon$ -PL 对其抑制效果无显著性差异( $P>0.05$ )。

在 25 °C 时,最大生长菌数分别为 8.65, 8.64, 8.55 lg(CFU/g)。而 25 °C 下,添加 0.00, 0.15 和 0.30 g/L 质量浓度  $\epsilon$ -PL 的双孢蘑菇样品中假单胞菌的比生长速率分别: 0.569, 0.655 和 0.523 h<sup>-1</sup>, 说明 0.00~0.30 g/L 质量浓度  $\epsilon$ -PL 对其抑制效果无显著性差异( $P>0.05$ )。

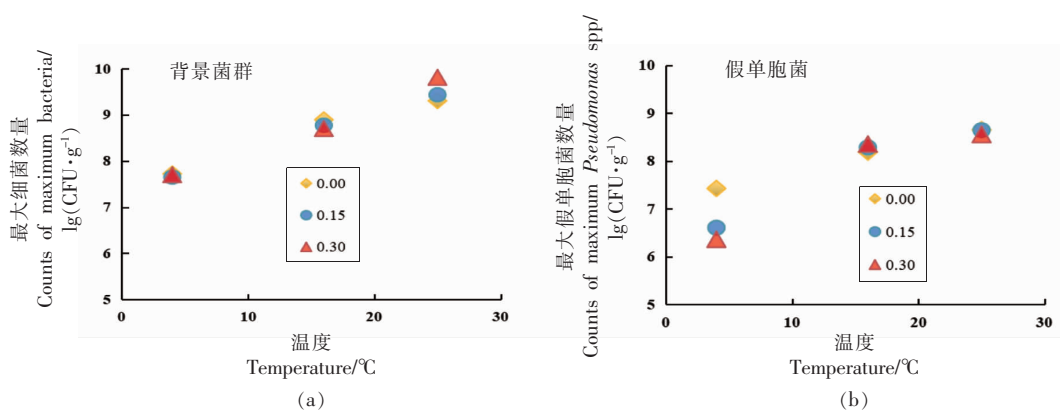


图 2 双孢蘑菇表面背景菌群及假单胞菌在不同温度、浓度  $\epsilon$ -PL 下最大生长菌数

Fig.2 The maximum bacterial populations of background microorganisms and *Pseudomonas* spp. on *Agaricus bisporus* at different temperature and different concentrations of  $\epsilon$ -PL

### 2.3 不同温度、 $\epsilon$ -PL 浓度条件下双孢蘑菇货架期方程

从微生物的角度来说,背景菌群的生长动力

学模型可以反映产品的货架期,表3列出了不同温度和不同浓度  $\epsilon$ -PL 下双孢蘑菇货架期方程,可为评价双孢蘑菇相关产品的货架期提供参考。

表3 双孢蘑菇的货架期方程

Table 3 The shelf life equation of *Agaricus bisporus*

温度/°C	$\epsilon$ -PL 质量浓度/g·L <sup>-1</sup>	预测模型方程
4	0.00	$Y(t)=14.751+(18.170-14.751)\exp\{-\exp[1+(46.667-t)\times 0.035\times 2.718/(18.170-14.751)]/2.303$
	0.15	$Y(t)=14.569+(18.818-14.569)\exp\{-\exp[1+(26.003-t)\times 0.025\times 2.718/(18.818-14.569)]/2.303$
	0.30	$Y(t)=14.489+(18.583-14.489)\exp\{-\exp[1+(28.049-t)\times 0.030\times 2.718/(18.583-14.489)]/2.303$
16	0.00	$Y(t)=15.118+(20.492-15.118)\exp\{-\exp[1+(15.212-t)\times 0.117\times 2.718/(20.492-15.118)]/2.303$
	0.15	$Y(t)=16.173+(20.342-16.173)\exp\{-\exp[1+(26.745-t)\times 0.114\times 2.718/(20.342-16.173)]/2.303$
	0.30	$Y(t)=16.238+(20.250-16.238)\exp\{-\exp[1+(29.802-t)\times 0.145\times 2.718/(20.250-16.238)]/2.303$
25	0.00	$Y(t)=13.901+(19.775-13.901)\exp\{-\exp[1+(7.294-t)\times 0.366\times 2.718/(19.775-13.901)]/2.303$
	0.15	$Y(t)=15.203+(19.835-15.203)\exp\{-\exp[1+(8.743-t)\times 0.295\times 2.718/(19.835-15.203)]/2.303$
	0.30	$Y(t)=14.138+(19.618-14.138)\exp\{-\exp[1+(8.354-t)\times 0.304\times 2.718/(19.618-14.138)]/2.303$

### 2.4 低温(4 °C)条件下 $\epsilon$ -PL 浓度对双孢蘑菇品质的影响

$\epsilon$ -PL 是一种多肽类的天然保鲜剂,抑菌性能良好,且对人体安全无害。 $\epsilon$ -PL 处理对双孢蘑菇感官评价如图3所示。第0天时,经0.15和0.30 g/L 质量浓度  $\epsilon$ -PL 处理的双孢蘑菇与对照组(0.00 g/L)相比,无明显差别,说明  $\epsilon$ -PL 对双孢蘑菇的外观品质没有影响。在贮藏温度为4 °C的条件下,双孢蘑菇的感官评分随着贮藏时间的增加而降低。在贮藏时间为第8天时,双孢蘑菇具有明显开伞的情况,菇体外观颜色变暗,菇体产生异味,出现褐变和腐烂,食用品质下降,失去商品价值。

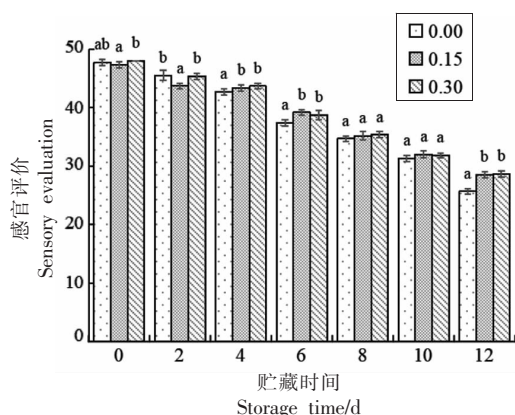
### 2.5 不同 $\epsilon$ -PL 浓度处理对双孢蘑菇白度的影响

双孢蘑菇菌盖的洁白与否是消费者判断双孢蘑菇品质的重要指标。采收后的双孢蘑菇菌盖较容易发生褐变,会导致双孢蘑菇中的营养物质流

失,降低双孢蘑菇的品质,影响其商品价值。 $L^*$  值越高提示双孢蘑菇褐变程度越低。如图4所示,不同处理组的  $L^*$  值均呈现不断降低的现象。经0.00,0.15和0.30 g/L 质量浓度的  $\epsilon$ -PL 处理的双孢蘑菇的  $L^*$  初始值分别为84.24,84.61,84.86,无显著性差异( $P>0.05$ )。对照组(0.00 g/L)的  $L^*$  值下降速率较快,贮藏4 d后  $L^*$  值从84.24降到76.26,而0.30 g/L 质量浓度的  $\epsilon$ -PL 处理组贮藏4 d时的  $L^*$  值为78.02,显著高于对照组( $P<0.05$ )。由此可知, $\epsilon$ -PL 处理能够延缓双孢蘑菇的褐变。贮藏第6天时,对照组与处理组的  $L^*$  值均降至75以下。

### 2.6 不同 $\epsilon$ -PL 浓度处理对双孢蘑菇硬度的影响

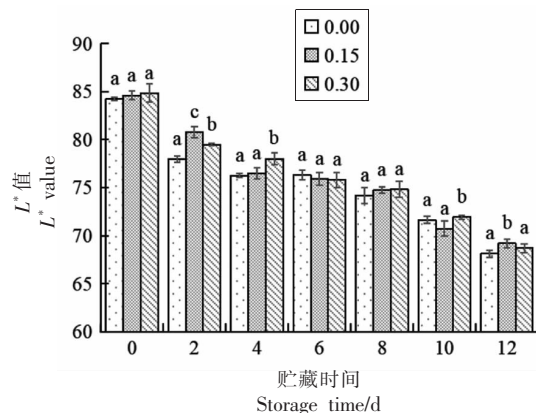
硬度是判定双孢蘑菇品质的一项重要指标。新鲜程度较高的双孢蘑菇组织结构紧密,其菇体内含水量高可以较好地维持细胞膨压,因此菇体的硬度值也较高<sup>[5]</sup>。双孢蘑菇在贮藏期间,由于呼



注:图中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著,相同字母表示差异不显著。

图 3 双孢蘑菇贮藏期间感官评价变化情况

Fig.3 Sensory evaluation of *Agaricus bisporus* during storage



注:图中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著,相同字母表示差异不显著。

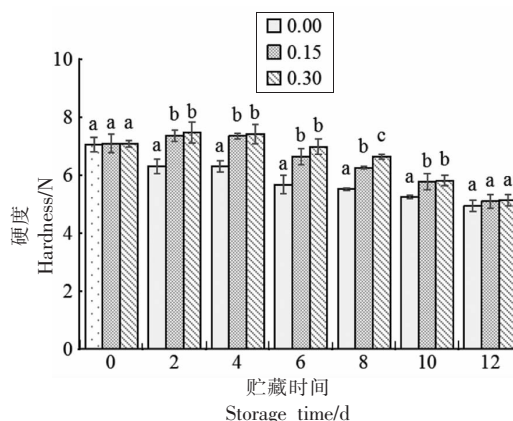
图 4 双孢蘑菇贮藏期间白度值变化情况

Fig.4 The value of  $L^*$  on *Agaricus bisporus* during storage

吸作用和蒸腾作用,菇体的水分会逐渐减少,并且菇体产生自溶,导致双孢蘑菇的硬度降低<sup>[16]</sup>。据报道,双孢蘑菇采后货架期短,易受微生物侵染,腐败细菌(如假单胞菌)产生的酶能够降解菇体的细胞壁,分解细胞内基质,使细胞产生破裂,膨压发生改变,导致菇体组织结构变软,硬度降低<sup>[17-19]</sup>。由图 5 可知,与对照组相比,在第 2,4,6,8 和 10 天时,经过  $\epsilon$ -PL 处理后,双孢蘑菇的菇体硬度能够显著提高( $P < 0.05$ )。第 8 天时,对照组的硬度指标减少了 21.76%,而 0.15 和 0.30 g/L 的  $\epsilon$ -PL 处理组仅分别下降了 11.72% 和 6.25%。由此说明, $\epsilon$ -PL 处理可以保持双孢蘑菇较高的硬果,有一定的保鲜效果。

## 2.7 不同 $\epsilon$ -PL 浓度处理对双孢蘑菇水分含量和失重的影响

双孢蘑菇子实体中含水量高,据报道,失重率达到 5% 时,双孢蘑菇菇体会产生皱缩,增加 PPO 等酶的活力,由此加速双孢蘑菇的褐变。双孢蘑菇的失重的主要原因是水分蒸腾作用。由图 6 和图 7 所示,4 °C 贮藏期间,经 0.00, 0.15 和 0.30 g/L 质量浓度的  $\epsilon$ -PL 处理的双孢蘑菇的初始水分含量分别为 92.21%, 92.38%, 93.43%, 无显著性差异( $P > 0.05$ )。失重率的上升与水分含量的下降属于对应关系。随着贮藏时间的延长,双孢蘑菇的失重率逐渐增大,而水分含量逐渐减小。在贮藏期间,与对照组相比, $\epsilon$ -PL 处理的双孢蘑菇其水分含量



注:图中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著,相同字母表示差异不显著。

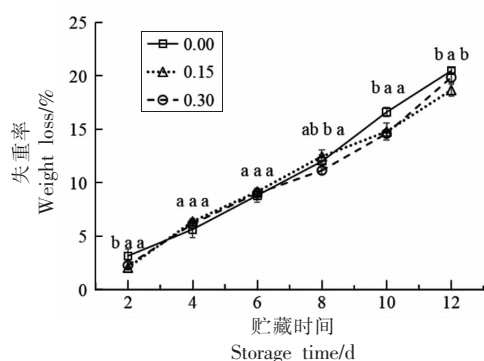
图 5  $\epsilon$ -PL 对贮藏期间双孢蘑菇硬度的影响

Fig.5 The effect of hardness on *Agaricus bisporus* treated with  $\epsilon$ -PL during storage

高于对照组,但没有显著差异( $P > 0.05$ );并且能够减缓双孢蘑菇的质量损失。

## 3 讨论

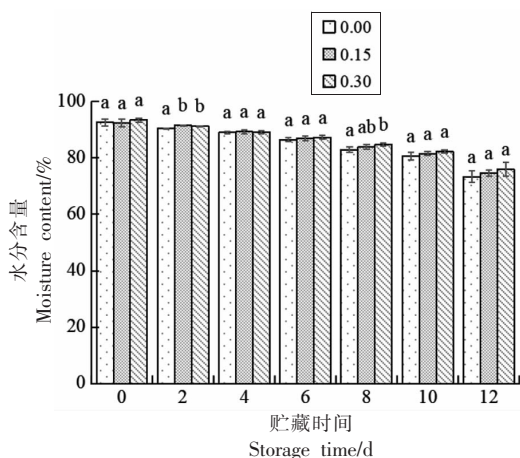
物理方法对设备要求较高。化学方法具有成本低和保鲜效果好的特点,但是化学残留物具有不可避免的毒副作用。因此,高效无毒的天然保鲜剂在双孢蘑菇的应用前景十分广阔。霍健聪等<sup>[19]</sup>研究发现超高压与  $\epsilon$ -PL 处理能够有效保持鲑鱼色泽,延长鲑鱼的货架期。但目前聚赖氨酸对于食



注:图中不同字母表示在0.05水平上差异显著,相同字母表示差异不显著。

图6 双孢蘑菇贮藏期间失重率变化情况

Fig.6 The weight loss rate of *Agaricus bisporus* during storage



注:图中不同字母表示在0.05水平上差异显著,相同字母表示差异不显著。

图7 双孢蘑菇贮藏期间水分含量变化情况

Fig.7 The moisture content of *Agaricus bisporus* during storage

用菌的保鲜研究相对较少。因此,本研究通过探究恒温(4~25℃)条件下不同质量浓度的 $\epsilon$ -PL(0.00, 0.15和0.30 g/L)添加量处理对双孢蘑菇表面背景菌群和假单胞菌生长的抑制作用,并建立相应的货架期预测模型,结合感官、色泽、质地、失重情况、水分变化等指标,综合探讨 $\epsilon$ -PL在不同温度条件下对双孢蘑菇的保鲜效果。研究发现,在4, 16和25℃时,双孢蘑菇在不同质量浓度的 $\epsilon$ -PL(0.15和0.30 g/L)作用下,背景菌群及假单胞菌的生长曲线呈现出完整的3个阶段。在4℃条件下 $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇表面假单胞菌生长有抑制作用,

质量浓度为0.30 g/L的 $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇表面假单胞菌生长有显著抑制作用( $P < 0.05$ )。周祺等<sup>[20]</sup>研究表明: $\epsilon$ -PL对肠球菌具有抑制作用。肖媛等<sup>[21]</sup>研究发现,经过 $\epsilon$ -PL处理,能够降低柑橘果实酸腐病的损伤接种发病率和病斑直径,破坏柑橘酸腐病细胞膜的完整性,抑制菌体细胞的生长繁殖,由此表明 $\epsilon$ -PL具有良好抑菌的作用。在16℃和25℃条件下 $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇表面背景菌群和假单胞菌生长无显著性差异( $P > 0.05$ )。在4℃条件下,不同质量浓度的 $\epsilon$ -PL(0.15和0.30 g/L)处理的双孢蘑菇感官品质、 $L^*$ 值、硬度和水分含量随着贮藏时间的增加而逐渐下降,失重率随着贮藏时间的延长逐渐减小。双孢蘑菇的褐变与菇体内的酚类物质氧化及微生物有着密切的关系<sup>[22]</sup>。本研究发现:与对照组相比, $\epsilon$ -PL能够提高双孢蘑菇的硬度和持水性,延缓菇体发生褐变,对延长双孢蘑菇的货架期具有积极的作用。研究报道表明 $\epsilon$ -PL可以提高樱桃,鲜切菠菜等果蔬的贮藏品质,并且延长其货架期<sup>[23-24]</sup>。综上所述,在4℃条件下,质量浓度为0.30 g/L的 $\epsilon$ -PL对双孢蘑菇表面假单胞菌生长有显著抑制作用,并且 $\epsilon$ -PL处理可以提高双孢蘑菇的品质,延长双孢蘑菇的贮藏期。

## 参 考 文 献

- [1] SONG Y, HU, Q H, WU, Y Y et al. Storage time assessment and shelf-life prediction models for postharvest *Agaricus bisporus*[J]. LWT-Food Science & Technology, 2019, 101(3): 360-365.
- [2] LAN W Q, SUN Y Q, ZHANG N N, et al. Effects of  $\epsilon$ -polylysine and rosemary extract on quality attributes and microbial communities in vacuum-packaged large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) during ice storage[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(3): 465-474.
- [3] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品添加剂使用标准: GB 2760-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Chinese Standards for Food Additives: GB 2760-2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [4] HUANG L. Optimization of a new mathematical mod-

- el for bacterial growth[J]. Food Control, 2013, 32(1): 283-288.
- [5] FANG T, HUANG L H, LIU L J, et al. Mathematical modeling of growth of *Salmonella* spp. and spoilage microorganisms in raw oysters[J]. Food Control, 2015, 53(7): 140-146.
- [6] LI J, WEI Q, HUANG L X, et al. Mathematical modeling *Pseudomonas* spp. growth and microflora composition variation in *Agaricus bisporus* fruiting bodies during chilled storage[J]. Postharvest Biology & Technology, 2020, 163(5): 1-9.
- [7] FETT W F, WELLS J M, CESCUTTI P, et al. Identification of exopolysaccharides produced by fluorescent pseudomonads associated with commercial mushroom (*Agaricus bisporus*) production[J]. Applied & Environmental Microbiology, 1995, 61(2): 513-517.
- [8] GEELS F P, HESEN L P W, GRIENSVEN L J L D. Brown discoloration of mushrooms caused by *Pseudomonas agarici*[J]. Journal of Phytopathology, 2008, 140(3): 249-259.
- [9] GILL W M. Bacterial diseases of *Agaricus* mushrooms[J]. Report Tottori Mycological Institute, 1995, 33(1): 34-55.
- [10] NYCHAS G J E, SKANDAMIS P N, TASSOU C C, et al. Meat spoilage during distribution[J]. Meat Science, 2008, 78(1): 77-89.
- [11] QIN Y 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 & Technology, 2015, 99(1): 73-79.
- [12] 李长城. 三文鱼鱼籽中单增李斯特菌预测模型建立及控制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- LI C C. Development of predictive models and control of *Listeria monocytogenes* in salmonroe[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
- [13] 彭亚博, 李晓婷, 方婷, 等. 鸡肉中沙门氏菌和背景菌群生长动力学模型[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 7-15.
- PENG Y B, LI X T, FANG T, et al. Modelling growth kinetics of *Salmonella* and background microorganisms in chicken[J]. Food Science, 2019, 40(9): 7-15.
- [14] LUKASSE L J S, POLDERDIJK J J. Predictive modeling of post-harvest quality evolution in perishables, applied to mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 59(2): 191-198.
- [15] LEE D U, CHANG M S, CHO S D, et al. Quality changes in mushrooms (*Agaricus bisporus*) due to their packaging materials during their storage[J]. Korean Journal of Food Preservation, 2013, 20(1): 7-13.
- [16] PEI F, YANG W J, SHI Y, et al. Comparison of freeze-drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(3): 702-710.
- [17] ZHANG K X, PU Y Y, SUN D W. Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78(8): 72-82.
- [18] JAWORSKA G, BERNA E, BIERNACKA A. Comparison of the texture of fresh and preserved *Agaricus bisporus* and *Boletus edulis* mushrooms[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2011, 45(8): 1659-1665.
- [19] 霍健聪, 邓尚贵, 李晓彤, 等. 超高压与 $\epsilon$ -聚赖氨酸处理对鲢鱼微生物和色泽的影响[J]. 中国食品学报, 2015, 15(7): 86-93.
- HUO J C, DENG S G, LI X T, et al. Effects of ultrahigh pressure and  $\epsilon$ -PL treatment on microbiological quality and color of skipjack[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(7): 86-93.
- [20] 周祺, 刘芳, 范晓然, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸对肠球菌的抑菌作用及机制[J]. 中国食品学报, 2018, 18(1): 65-72.
- ZHOU Q, LIU F, FAN X R, et al. Antimicrobial activity and mechanism of  $\epsilon$ -polylysine on *Enterococcus*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(1): 65-72.
- [21] 肖媛, 潘兆平, 尹春晓, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸对柑橘酸腐菌的抑菌活性及作用机制[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 221-229.
- XIAO Y, PAN Z P, YIN C X, et al. Antifungal activity and mechanism of  $\epsilon$ -polylysine against *Geotrichum citri-aurantii*[J]. Food Science, 2020, 41(19): 221-229.
- [22] TAO F, GAO, H Y, GE L M, et al. Vacuum



- cooling retards degradation of cell wall matter in *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 264–268.
- [23] 樊敏, 唐紫薇, 李立.  $\epsilon$ -聚赖氨酸盐酸盐/壳聚糖复合涂膜对樱桃的保鲜效果[J]. 包装工程, 2020, 41(9): 29–35.
- FAN M, TANG Z W, LI L. Effects of  $\epsilon$ -polylysine hydrochloride/chitosan composite film on cherry preservation[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(9): 29–35.
- [24] 郁杰, 张雨宸, 谢晶. 低强度 UV-A 光循环照射结合  $\epsilon$ -聚赖氨酸处理对 4 °C 下鲜切菠菜保鲜效果的研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 154–160.
- YU J, ZHANG Y C, XIE J. The effect of cyclic irradiation of low-intensity UV-A combined with  $\epsilon$ -polylysine on the preservation of fresh-cut spinach at 4 °C[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(18): 154–160.

### Effects of $\epsilon$ -Polylysine Hydrochloride on Microorganisms Growth and Freshness of *Agaricus bisporus* Fruiting Bodies during Storage

Wei Qi<sup>1,2</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Liu Beibei<sup>2</sup>, Luo Xiaofang<sup>2</sup>, Fang Ting<sup>2</sup>, Chen Bingzhi<sup>2</sup>, Jiang Yuji<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Life Science, Ningde Normal University, Ningde 352100, Fujian

<sup>2</sup>College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

**Abstract** This research was designed to investigate the shelf life of *Agaricus bisporus* fruiting bodies during storage. The effect of different concentrations of  $\epsilon$ -Polylysine hydrochloride (0.15 and 0.30 g/L;  $\epsilon$ -PL) on the growth of background microorganisms and *Pseudomonas* spp. on *Agaricus bisporus* fruiting bodies were established at 4 °C, 16 °C and 25 °C, respectively. And the shelf life prediction model of *Agaricus bisporus* fruiting bodies was built. In the meantime, the samples of *Agaricus bisporus* fruiting bodies were collected during the storage to investigate the score of sensory,  $L^*$  value, hardness, weight loss rate, and moisture content. Results showed that treatment with  $\epsilon$ -PL (0.15 and 0.30 g/L) could interfere with bacterial growth on *Agaricus bisporus* fruiting bodies. The background microorganisms and *Pseudomonas* spp. on *Agaricus bisporus* fruiting bodies were modeled with three different phases: lag phase, log phase, and stationary phase. The  $\epsilon$ -PL could inhibit the growth of *Pseudomonas* spp. on the surface of *Agaricus bisporus* fruiting bodies at 4 °C. The  $\epsilon$ -PL (0.30 g/L) showed the strongest inhibitory against *Pseudomonas* spp. on the surface of *Agaricus bisporus* fruiting bodies compared to the other concentration of  $\epsilon$ -PL (0.00 and 0.15 g/L). The study suggested that the combination of  $\epsilon$ -PL and low temperature could effectively improve the quality and the shelf life of *Agaricus bisporus* fruiting bodies during storage.

**Keywords** *Agaricus bisporus*;  $\epsilon$ -polylysine hydrochloride; microorganisms; *Pseudomonas* spp.; mathematical model