

贮藏温度对双孢蘑菇褐变和抗氧化活性的影响及动力学研究

王丽芳, 王晓拓, 王志东

(中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

摘要: 以双孢蘑菇为原料, 研究 1 °C、4 °C、7 °C 三种贮藏温度对超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性以及抗氧化能力的影响, 探讨了双孢蘑菇褐变度、总酚、抗坏血酸与抗氧化能力之间相关性, 并对不同贮藏温度下双孢蘑菇抗氧化活性变化的动力学模型进行研究。结果表明, 1 °C 处理能显著抑制双孢蘑菇贮藏期间总酚、抗坏血酸的降低, 延缓 SOD、CAT 活性的上升和峰值的出现, 保持贮藏期间较高的抗氧化活性, 有效控制褐变。相关性分析结果显示, 酚类和抗坏血酸在双孢蘑菇抗氧化体系中发挥重要的作用, 贮藏期间菌肉色泽变化与抗氧化能力密切相关。在 Arrhenius 动力学方程基础上得出贮藏期间 L^* 值、抗坏血酸、抗氧化能力 (TEAC、FRAP 法) 变化的速率常数随贮藏温度的升高而增大, 拟合所得各指标变化最终预测模型方程可快速可靠的预测 274.15 ~ 280.15 K (1 °C~7 °C) 双孢蘑菇褐变度及抗氧化能力的变化。

关键词: 双孢蘑菇; 贮藏温度; 抗氧化; 褐变; 动力学模型

文章编号: 1673-9078(2015)2-157-163

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.2.027

Kinetics and Effect of Storage Temperature on the Browning and Antioxidant Activity of *Agaricus bisporus*

WANG Li-fang, WANG Xiao-tuo, WANG Zhi-dong

(Institute of Agro-Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The effects of three storage temperatures, *viz.* 1 °C, 4 °C, and 7 °C, on the superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities, as well as antioxidant activity of *Agaricus bisporus* were investigated. The correlations between antioxidant capacity, total phenolic content, and ascorbic acid content, as well as the degree of browning of *Agaricus bisporus* were explored, and a kinetic model for the change in antioxidant activity of *Agaricus bisporus* during storage was evaluated. The results showed that low temperature storage (1 °C) could effectively inhibit the decline of total phenolic and ascorbic acid content in *Agaricus bisporus* during storage; moreover, it could delay the rise and occurrence of the peak values of SOD and CAT activities, maintain a relatively high antioxidant activity, and effectively inhibit browning. The correlation analysis showed that phenols and ascorbic acid played an important role in the antioxidative properties of *Agaricus bisporus*, and the color change in mushroom was closely related to the antioxidant capacity during storage. L^* value, ascorbic acid level, and rate of change in antioxidant capacity (Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays) were obtained based on the Arrhenius equation, and increased with elevated storage temperatures. Using the final model equations, the browning and antioxidant activity of *Agaricus bisporus* could be predicted rapidly and reliably at storage temperatures ranging from 274.15 K to 280.15 K.

Key words: *agaricus bisporus*; storage temperature; antioxidant; browning; kinetic model

双孢蘑菇 (*Agaricus bisporus*) 具有很强的抗氧化能力, 能提高机体抵御多种疾病的免疫功能, 降低患慢性疾病的风险^[1~3]。据中国食用菌协会统计, 目前全球年产双孢蘑菇 460 万 t, 中国约占全球产量与出口量的 50%^[4]。蘑菇产品终端市场主要分三个区域, 鲜

收稿日期: 2014-07-22

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程

作者简介: 王丽芳 (1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品质量与安全

通讯作者: 王志东 (1958-), 男, 研究员

品消费处于首位, 其次是简单加工以及深加工产品。目前双孢蘑菇主要用于出口, 国内消费量并不大, 但随着人们生活水平的提高, 尤其是对健康、营养的重视, 国内需求将不断增加, 中国有望成为双孢蘑菇消费第一大国。但双孢蘑菇采后褐变导致品质下降迅速, 保鲜问题突出, 在国内、国际市场上竞争力较弱, 因此, 提高其鲜品品质是保证双孢蘑菇产业健康发展及增强国际竞争力的关键。

自由基可引起蛋白质、脂类、核苷酸等生物大分

子物质的氧化损失, 研究指出, 自由基积累对组织细胞具有伤害作用, 细胞膜损伤导致的酶和底物的隔离分布减弱是引发褐变的直接诱因^[5-6]。植物体内的自由基清除体系包括酶类抗氧化物质和非酶类抗氧化物质, SOD、CAT、酚类、抗坏血酸等与植物组织抗氧化活性和果实成熟衰老进程密切相关^[7-8]。不仅采前因素如品种、成熟度、生长条件等能影响果蔬的抗氧化能力, 采后贮藏条件也是影响抗氧化能力的重要因素^[9]。因此, 果蔬抗氧化能力已成为评价其采后品质的重要指标。

蘑菇是膳食抗氧化剂的优质来源, 多数研究表明, 低温能有效延长双孢蘑菇货架期。Minamide 等发现 1 °C 贮藏平菇、香菇、滑菇、金针菇货架期约为 14~20 d, 6 °C 贮藏仅为 10 d^[10]。Mohapatra 等认为, 贮藏温度是影响双孢蘑菇色泽变化的重要因素^[11], 然而, 关于贮藏温度对双孢蘑菇褐变及抗氧化活性的影响研究较少。为此, 本文以双孢蘑菇为试材, 分析不同贮藏温度对双孢蘑菇抗氧化酶、抗氧化活性物质以及褐变的影响, 探究不同温度贮藏对双孢蘑菇褐变的抑制作用, 应用动力学模型建立褐变度和抗氧化能力变化的预测模型, 以期为提高双孢蘑菇贮藏品质提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

白色双孢蘑菇, 北京惠民弘康食品有限公司提供, 开伞度 < 7, 菇盖直径约为 40 mm, 挑选色泽洁白, 无病虫害、机械伤的双孢蘑菇进行试验。

PE 保鲜袋, 脱普日用化学品(中国)有限公司。

1.2 主要试剂

Trolox、ABTS、PVPP, 美国 Sigma 公司; NBT、吐温-20, 美国 Amresco 公司; 福林酚试剂、甲硫氨酸、焦性没食子酸、无水碳酸钠、EDTA-Na₂、铁氰化钾、三氯化铁、三氯乙酸、30%过氧化氢、偏磷酸、乙醇、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠等均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.3 仪器与设备

AC120S 精密天平, 德国 Sartorius 公司; JYL-C010 打浆机, 九阳股份有限公司; Sigma3K 高速台式冷冻离心机, 北京五洲东方有限公司; T6 新世纪紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; SMY-2000ST 测色色差计, 北京盛名扬科技开发有限

责任公司; HH-4 数显恒温水浴锅, 江苏省金坛市荣华仪器有限责任公司。

1.4 试验方法

将当天采收双孢蘑菇切除黑褐色根部, 要求菌柄长度不超过 1 cm, 均分成 3 组, 分别装入 30 cm×40 cm 的带孔塑料筐中, 装料量为 1/2, PE 保鲜袋套筐折叠封口, 并分别于 1 °C、4 °C、7 °C 贮存。每隔 2 天随机取样观察贮藏期间褐变度、SOD 活性、CAT 活性、总酚含量、抗坏血酸含量、TEAC 值和 FRAP 值的变化。其中褐变度每次测定重复 10 次, 其余各指标测定重复 3 次。

1.5 测定方法

1.5.1 褐变度的测定

用标准陶瓷板标定 X=88.87、Y=93.73、Z=99.49 作为工作标准。测定 CIE-Lab 表色系中 L* 值(从 0~100 变化, 0 是黑色, 100 是白色)表示样品褐变度, L* 值越大, 表示样品颜色越白。菌褶上方 1 cm 处纵切, 每隔 120 °取 3 点测定菌肉组织褐变度, 结果取平均值。

1.5.2 抗氧化酶的测定

SOD 活性测定参照 Liu^[12]的方法并略作修改。

CAT 活性测定参考 Liu^[12]的方法并作修改。

1.5.3 总酚含量的测定

菌盖组织总酚含量测定参照 Gao^[13]的方法并作修改。以没食子酸绘制标准曲线, 样品总酚含量换算为每克鲜质量样品中没食子酸的含量/(μg/g)。

1.5.4 抗坏血酸含量的测定

菌盖组织抗坏血酸含量采用 Mishra^[14]的 2,6-二氯酚靛酚法。以标准抗坏血酸绘制标准曲线, 样品抗坏血酸含量换算为每克鲜质量样品中标准抗坏血酸的含量/(μg/g)。

1.5.5 抗氧化能力的测定

TEAC 法测定参考 Yilmaz^[15]并略作修改。以 Trolox 绘制标准曲线, ABTS 自由基清除能力以每 100 g 鲜质量样品中含有 Trolox 标准品当量表示/(μmol Trolox/100 g)。

FRAP 法测定参考 Liu^[16]并作修改。测定结果以吸光度值表示。

1.5.6 动力学方程分析

1.5.6.1 动力学模型拟合

对双孢蘑菇贮藏期间褐变度和抗氧化能力的变化分别应用零阶或一阶动力学模型进行拟合分析, 动力学方程分别如下

零阶模型: $Q=Q_0-kt$

一阶模型： $Q=Q_0\exp(-kt)$

式中： Q_0 为初始褐变度和抗氧化能力值； t 为贮藏时间； Q 为 t 时刻的褐变度及抗氧化能力值； k 为各指标变化速率常数。

1.5.6.2 活化能

利用 Arrhenius 方程对双孢蘑菇贮藏期间褐变度及抗氧化能力参数的变化速率常数与温度之间的关系进行拟合，求得贮藏期间双孢蘑菇褐变度及抗氧化能力指标变化的活化能 (E_a)，方程如下

Arrhenius 方程：

$$K=A\exp^{-E_a/RT}$$

式中： k 为反应速率常数； R 为摩尔气体常量； T 为贮藏温度； E_a 为活化能； A 为指前因子。

1.5.6.3 预测模拟方程

最后由不同贮藏温度条件下拟合所得动力学模型和 Arrhenius 方程计算得到反应速率常数能建立双孢蘑菇褐变度及抗氧化能力变化的最终预测模型方程，方程如下^[17]：

$$F(Q)=kt=A\exp(-E_a/RT)/t$$

式中： k 为反应速率常数； R 为摩尔气体常量； T 为贮藏温度； E_a 为活化能； t 为贮藏时间； A 为指前因子。

1.6 数据处理

所有实验数据采用 SAS 9.2 软件进行统计分析，结果表示为平均值加减标准差，其中抗氧化物质与抗氧化能力的关系运用 Pearson 相关性分析。线性拟合和回归分析采用 SPSS 18.0 软件进行分析处理。模型的拟合准确度通过平均相对百分比误差值来确定，定义如下：

$$P/\% = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{V_e - V_p}{V_e} \times 100$$

式中： V_e 、 V_p 分别为每次试验的测试值和预测值； N 为试验次数。 $P < 10\%$ ，该模型拟合度可以接受。

2 结果与分析

2.1 褐变度

色泽是衡量双孢蘑菇商品价值的重要指标之一，采后贮藏期间蘑菇菌盖的褐变现象十分普遍，已成为导致商品价值降低的重要原因^[18]。如图 1 所示，随贮藏时间延长，双孢蘑菇 L^* 值显著降低 ($p < 0.05$)，其中贮藏前期下降明显，第 6~9 d 变化较平缓，之后呈下降趋势。在相同贮藏时间内，贮藏温度越高， L^* 值越低，且不同温度处理之间差异显著 ($p < 0.05$)。经过 12 d 贮藏，1℃贮藏条件下双孢蘑菇 L^* 值与 4℃、7℃ 相比分别高 4.13% 和 6.68%。可见，1℃贮藏能显著抑

制双孢蘑菇整个贮藏期间褐变的发生。

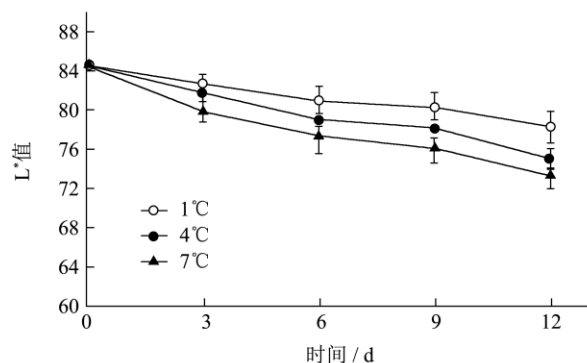


图 1 贮藏温度对双孢蘑菇色泽的影响

Fig.1 Effect of storage temperature on the color of *Agaricus bisporus*

2.2 抗氧化酶

不同贮藏温度对双孢蘑菇抗氧化酶活性的影响如图 2 所示。双孢蘑菇贮藏期间，随贮藏时间延长 SOD 活性总体呈显著下降趋势 ($p < 0.05$)，CAT 活性变化随贮藏时间延长呈先上升后显著降低趋势 ($p < 0.05$)，且不同贮藏温度对双孢蘑菇 SOD、CAT 活性影响差异显著 ($p < 0.05$)。

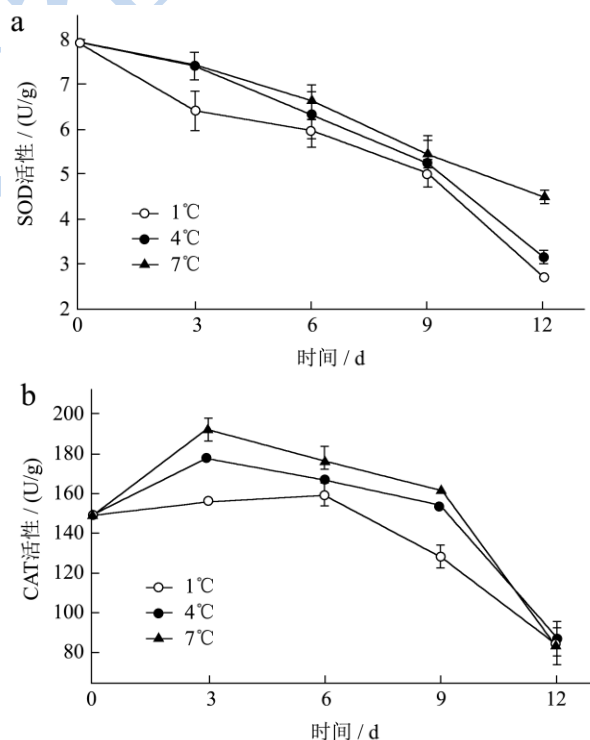


图 2 贮藏温度对双孢蘑菇 SOD、CAT 活性的影响

Fig.2 Effect of storage temperature on the SOD and CAT activities of *Agaricus bisporus*

自由基积累、活性氧增加，诱导 SOD、CAT 活性升高或高峰出现，这种上升视为衰老的指标^[19]。如图 2 所示，1℃贮藏有效延缓了 SOD 活性的上升，效果

优于 4 °C 和 7 °C；与 4 °C、7 °C 相比，1 °C 使 CAT 活性高峰的出现时间推迟了 3 d。综上所述，1 °C 贮藏能有效延缓保护酶活性的上升或峰值的出现，延缓衰老进程。

2.3 总酚含量

蘑菇中含有多种酚类物质，多数研究表明，酚类物质具有出色的抗氧化能力，能有效的清除自由基^[20-21]。图 3 为不同贮藏温度对双孢蘑菇总酚含量的影响，除贮藏末期略有上升外，随贮藏时间延长，双孢蘑菇总酚含量总体呈明显下降趋势 ($p < 0.05$)，且不同温度之间差异显著 ($p < 0.05$)。1 °C 贮藏与 4 °C 和 7 °C 相比，可显著抑制贮藏过程中总酚含量的降低，在低温贮藏葡萄^[9]、蓝莓汁^[22]的研究中也得出了相类似的结果。不同贮藏条件下，总酚含量的下降可能原因是酚类物质氧化导致酶促褐变，而贮藏末期双孢蘑菇总酚含量的上升可能与贮藏期间失水有关。

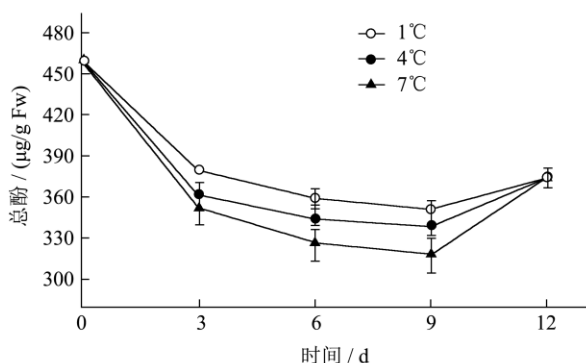


图 3 贮藏温度对双孢蘑菇总酚含量的影响

Fig.3 Effect of storage temperature on the total phenolic content of *Agaricus bisporus*

2.4 抗坏血酸含量

抗坏血酸是膳食抗氧化剂的另一重要来源，能保护身体免于氧化威胁，减轻抗坏血酸过氧化物酶基底的氧化反应^[23]。图 4 为不同贮藏温度对双孢蘑菇抗坏血酸含量的影响，随贮藏时间延长，1 °C、4 °C、7 °C 贮藏抗坏血酸含量均呈显著下降趋势，其中 1 °C 贮藏

能显著抑制贮藏期间抗坏血酸含量的损失，且不同贮藏温度之间差异显著 ($p < 0.05$)。经过 12 d 贮藏，1 °C 贮藏条件下双孢蘑菇抗坏血酸含量与 4 °C 和 7 °C 相比分别高 25.1% 和 47.7%。该结论与潘超然等人关于锥栗的研究结果一致，研究指出温度的高低直接影响酶的活性，保持贮藏环境中适宜低温是保存抗坏血酸的重要措施^[24]。

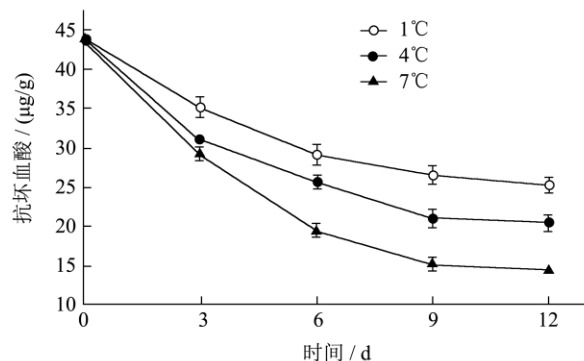


图 4 贮藏温度对双孢蘑菇抗坏血酸含量的影响

Fig.4 Effect of storage temperature on the ascorbic acid content of *Agaricus bisporus*

2.5 抗氧化能力

表 1 为不同贮藏温度对双孢蘑菇抗氧化能力的影响。除贮藏末期略有上升外，随贮藏时间延长，双孢蘑菇 TEAC 值和 FRAP 值均呈显著下降趋势 ($p < 0.05$)。不同贮藏温度贮藏末期抗氧化能力出现上升原因可能是由于贮藏失水导致的单位干重增加，提高了乙醇提取物的抗氧化能力。

不同贮藏温度对双孢蘑菇抗氧化能力影响显著 ($p < 0.05$)，与 4 °C 和 7 °C 相比，1 °C 贮藏有利于 ABTS 阳离子自由基清除能力以及铁离子还原力的保持，显著延缓了贮藏期间抗氧化能力的下降。1 °C 贮藏 9 d 后，双孢蘑菇 TEAC、FRAP 值分别为 4 °C 下贮藏的 1.16 倍、1.05 倍；7 °C 下贮藏的 1.36 倍、1.17 倍。可见，贮藏温度越高，随贮藏时间的延长双孢蘑菇总抗氧化能力越低。

表 1 贮藏温度对双孢蘑菇抗氧化能力的影响

Table 1 Effect of storage temperature on the antioxidant capacity of *Agaricus bisporus*

时间/d	TEAC (mg TE/100g FW)			FRAP		
	1 °C	4 °C	7 °C	1 °C	4 °C	7 °C
0	117±3.41 ^a	117±3.41 ^a	117±3.41 ^a	2.35±0.06 ^a	2.35±0.06 ^a	2.35±0.06 ^a
3	106±4.12 ^a	97.0±1.90 ^b	95.3±1.45 ^b	2.13±0.07 ^a	2.08±0.03 ^a	2.08±0.03 ^a
6	91.6±0.52 ^a	89.4±1.84 ^a	74.5±1.24 ^b	2.09±0.18 ^a	1.89±0.11 ^{ab}	1.70±0.09 ^b
9	79.5±1.96 ^a	68.5±1.75 ^b	58.5±1.84 ^c	1.93±0.06 ^a	1.84±0.05 ^a	1.65±0.12 ^b
12	85.9±0.82 ^a	84.8±1.97 ^a	83.9±1.80 ^a	1.91±0.01 ^a	1.87±0.06 ^a	1.82±0.11 ^a

注：表中不同小写字母表示不同贮藏温度之间差异显著 (p<0.05)。

2.6 相关关系

为了分析双孢蘑菇贮藏期间抗氧化活性对贮藏品质的影响, 选取 L^* 值、总酚含量、抗坏血酸含量、SOD 活性、CAT 活性、TEAC 值和 FRAP 值进行相关性分析。

表 2 双孢蘑菇品质和抗氧化能力的相关性分析

Table 2 Analysis of correlation between the quality and antioxidant capacity of *Agaricus bisporus*

贮藏温度/℃	相关性	SOD	CAT	TEAC	FRAP
1	L^* 值	0.971**	0.772	0.895*	0.945*
	总酚	0.631	0.216	0.867	0.865
	抗坏血酸	0.871	0.573	0.966**	0.972**
4	L^* 值	0.959**	0.643	0.795	0.902*
	总酚	0.431	-0.154	0.858	0.900*
	抗坏血酸	0.829	0.362	0.933*	0.986**
7	L^* 值	0.939*	0.488	0.775	0.854
	总酚	0.450	-0.308	0.902*	0.881*
	抗坏血酸	0.874	0.293	0.901*	0.950*

注：*表示差异显著(p<0.05), **表示差异极显著(p<0.01)。

由表 2 可知, 菌肉 L^* 值和抗氧化酶及不同抗氧化方法之间存在普遍相关性。各温度贮藏条件下 L^* 值与 SOD 活性; 1 °C、4 °C 贮藏条件下, L^* 值与 FRAP 值

及 1 °C 贮藏条件下 L^* 值与 TEAC 值均呈显著正相关。此外相关性分析显示, 1 °C、4 °C、7 °C 贮藏条件下 L^* 值与抗坏血酸含量具有显著相关性, 相关系数分别为 0.932、0.940、0.970。可见, 双孢蘑菇贮藏期间褐变度 (L^*) 主要受抗坏血酸含量、SOD 活性、TEAC 和 FRAP 值的影响。

抗坏血酸含量与 TEAC、FRAP 之间普遍存在显著正相关性: 1 °C 下贮藏, 抗坏血酸含量与 TEAC、FRAP 值, 4 °C 贮藏条件下与 FRAP 值相关性均达到极显著水平。4 °C 和 7 °C 贮藏条件下, 双孢蘑菇总酚含量与 TEAC、FRAP 之间表现出相关效应。一般地, 相关性越强, 该物质可能对抗氧化能力的贡献越大, 该结果说明总酚和抗坏血酸在双孢蘑菇抗氧化体系中发挥了重要的作用。

2.7 贮藏温度对褐变度及抗氧化活性影响的

动力学分析

根据不同贮藏温度下双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 值的变化规律, 可以建立 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 值随贮藏时间变化的零阶或一阶动力学模型, 得到的动力学模型回归方程、反应速率常数 (k)、决定系数 (R^2) 见表 3。

表 3 不同温度贮藏期间双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 变化的动力学分析

Table 3 Dynamic analysis of the changes in L^* value, ascorbic acid content, TEAC, and FRAP of *Agaricus bisporus* at different storage temperatures

测定指标	贮藏温度/K	回归方程	速率常数 (k)	决定系数 (R^2)	活化能 Ea/(kJ/mol)
L^* 值	274.15	$y = -0.497t + 84.300$	0.497	0.982	59.36
	277.15	$y = -0.745t + 84.171$	0.745	0.979	
	280.15	$y = -0.873t + 83.453$	0.873	0.956	
抗坏血酸含量	274.15	$y = 41.152 \exp(-0.046t)$	0.046	0.931	77.42
	277.15	$y = 39.876 \exp(-0.064t)$	0.064	0.927	
	280.15	$y = 39.300 \exp(-0.096t)$	0.096	0.932	
TEAC	274.15	$y = 118.568 \exp(-0.044t)$	0.044	0.993	60.26
	277.15	$y = 117.607 \exp(-0.056t)$	0.056	0.961	
	280.15	$y = 118.345 \exp(-0.078t)$	0.078	0.998	
FRAP	274.15	$y = 2.300 \exp(-0.017t)$	0.017	0.930	95.17
	277.15	$y = 2.300 \exp(-0.028t)$	0.028	0.936	
	280.15	$y = 2.326 \exp(-0.042t)$	0.042	0.938	

如表 3 所示, 不同贮藏温度下双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 值随贮藏时间变化的动力学模型回归方程决定系数均大于 0.91, 说明所得的回归方程具有较高的拟合度。同时发现, 生化反应速率常数 k 随贮藏温度的升高而增加, 运用 Arrhenius

方程求得 274.15~280.15 K (1 °C~7 °C) 贮藏温度范围内, 双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 的反应速率常数及反应活化能。由表中可知, 贮藏期间双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量以及 TEAC 和 FRAP 值变化的活化能分别为 59.36、77.42、60.26、95.17

kJ/mol。

根据表 3 中不同贮藏温度条件下拟合所得动力学模型和 Arrhenius 方程计算得到反应速率常数能建立

表 4 不同温度贮藏期间双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 变化的动力学分析

Table 4 Dynamic analysis of the changes in L^* value, ascorbic acid content, TEAC, and FRAP of *Agaricus bisporus* at different storage temperatures

测定指标	预测模型方程	决定系数 (R^2)	P 值/%
L^* 值	$C(t, T) = 83.862 - \exp(25.116 - 7080.523/T)t$	0.926	0.55
抗坏血酸含量	$C(t, T) = 39.819 - \exp(28.343 - 7679.720/T)t$	0.885	4.78
TEAC	$C(t, T) = 116.420 - \exp(24.366 - 6296.436/T)t$	0.989	0.89
FRAP	$C(t, T) = 2.312 - \exp(-2.795 - 0.008/T)t$	0.783	0.28

基于双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 的预测模型所获得的预测值和实测值之间平均相对误差均小于 10%，预测值和实测值具有很高的一致性，说明模型的拟合精确度在可接受范围内，因此，根据此模型可以快速可靠的预测 274.15~280.15 K (1 °C~7 °C) 贮藏条件下双孢蘑菇褐变度及抗氧化能力的变化。

3 结论

3.1 不同贮藏温度下，随贮藏时间延长，双孢蘑菇总酚、抗坏血酸含量、SOD 活性、TEAC 和 FRAP 值逐渐降低，CAT 活性呈先上升后下降趋势，且随贮藏温度的升高，总酚、抗坏血酸、TEAC 和 FRAP 值损失加快。

3.2 1 °C 贮藏能显著抑制双孢蘑菇贮藏期间总酚、抗坏血酸含量的降低，延缓 SOD、CAT 活性的上升和峰值的出现，保持双孢蘑菇较高的抗氧化活性，有效控制贮藏期间双孢蘑菇褐变。

3.3 相关性分析结果表明，酚类和抗坏血酸在双孢蘑菇抗氧化体系中发挥重要的作用，贮藏期间菌肉褐变度与抗氧化能力密切相关， L^* 值变化主要受抗坏血酸含量、SOD 活性、TEAC 值和 FRAP 值的影响。

3.4 不同温度贮藏下双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 变化符合一级动力学模型，决定系数均大于 0.91。在 Arrhenius 动力学方程基础上得出的双孢蘑菇贮藏期间 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 变化的速率常数随贮藏温度的升高而增大。拟合所得双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 变化的最终预测模型方程可以快速可靠的预测 274.15~280.15 K (1 °C~7 °C) 贮藏条件下双孢蘑菇褐变度及抗氧化能力的变化。

参考文献

[1] Oke F, Aslim B. Protective effect of two edible mushrooms

双孢蘑菇 L^* 值、抗坏血酸含量、TEAC 和 FRAP 变化的最终预测模型方程，结果如表 4 所示。

against oxidative cell damage and their phenolic composition [J]. Food Chemistry, 2011, 128(3): 613-619

[2] Ferreira I C F R, Baptista P, Vilas-Boas M, et al. Free-radical scavenging capacity and reducing power of wild edible mushrooms from northeast Portugal: Individual cap and stipe activity [J]. Food Chemistry, 2007, 100(4): 1511-1516

[3] Tsai S Y, Huang S J, Lo S H, et al. Flavour components and antioxidant properties of several cultivated mushrooms [J]. Food Chemistry, 2009, 113(2): 578-584

[4] 李树明. 中国双孢蘑菇生产的经济效率分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011

LI Shu-ming. Study on economic efficiency of *Agaricus Bisporus* production in China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011

[5] Jolivet S, Arpin N, Wichers H J, et al. *Agaricus bisporus* browning: a review [J]. Mycological Research, 1998, 102(12): 1459-1483

[6] Valko M, Rhodes C J, Moncol J, et al. Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer [J]. Chemico-biological Interactions, 2006, 160(1): 1-40

[7] Lacan D, Baccou J C. High levels of antioxidant enzymes correlate with delayed senescence in nonnetted muskmelon fruits [J]. Planta, 1998, 204(3): 377-382

[8] Jimenez A, Creissen G, Kular B, et al. Changes in oxidative processes and components of the antioxidant system during tomato fruit ripening [J]. Planta, 2002, 214(5): 751-758

[9] 刘亮, 陈伟, 杨震峰, 等. 贮藏温度对葡萄果实采后抗氧化活性的影响及动力学分析[J]. 中国食品学报, 2012, 12(4): 134-139

LIU Liang, CHEN Wei, YANG Zhen-feng, et al. Kinetic analysis and antioxidant activity of postharvest grape fruit at different storage temperatures [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(4): 134-139

[10] Minamide T, Habu T, Ogata K. Effect of storage temperature on keeping freshness of mushrooms after harvest [J]. Journal

- of Japanese Society of Food Science and Technology, 1980, 27(6): 281-287
- [11] Mohapatra D, Bira Z M, Kerry J P, et al. Postharvest hardness and color evolution of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(3): 146-152.
- [12] Liu J, Wu Y, Kan J, et al. Changes in reactive oxygen species production and antioxidant enzyme activity of *Agaricus bisporus* harvested at different stages of maturity [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(9): 2201-2206
- [13] 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
- [14] Mishra K K, Pal R S, Arunkumar R, et al. Antioxidant properties of different edible mushroom species and increased bioconversion efficiency of *Pleurotus eryngii* using locally available casing materials [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2): 1557-1563
- [15] Yilmaz E, Karadeniz F. Effect of storage on the bioactive compounds and antioxidant activity of quince nectar [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(3): 718-725
- [16] Liu J, Jia L, Kan J, et al. In vitro and in vivo antioxidant activity of ethanolic extract of white button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 51: 310-316
- [17] 汪琳,应铁进.番茄果实采后贮藏过程中的颜色动力学模型及其应用[J].农业工程学报,2001,17(3):118-121
WANG Lin, YING Tie-jin. Kinetic model on surface color in tomato fruits during the post-harvest storage and its application [J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(3): 118-121
- [18] Liu Z, Wang X. Changes in color, antioxidant, and free radical scavenging enzyme activity of mushrooms under high oxygen modified atmospheres [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 69: 1-6
- [19] 赵习娟,李哲.采后蔬菜衰老与抗氧化酶活性的关系[J].生物技术,2010,20(6):85-87
ZHAO Xi-heng, LI Zhe. Relationship between senescence and antioxidative enzymes activities of postharvest vegetables [J]. Biotechnology, 2010, 20(6): 85-87
- [20] Velioglu Y S, Mazza G, Gao L, et al. Antioxidant activity and total phenolics in selected fruits, vegetables, and grain products [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(10): 4113-4117
- [21] Choi Y, Lee S M, Chun J, et al. Influence of heat treatment on the antioxidant activities and polyphenolic compounds of Shiitake (*Lentinus edodes*) mushroom [J]. Food Chemistry, 2006, 99(2): 381-387
- [22] 王行,马永昆,于立志,等.贮藏条件对超高压处理蓝莓汁酚类物质及抗氧化活性的影响[J].现代食品科技,2014, 30(1): 101-107
WANG Xing, MA Yong-kun, YU Li-zhi, et al. Effects of storage condition on phenolics and antioxidant activity of high hydrostatic pressure treated blueberry juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 101-107
- [23] Englard S., Seifter S.. The biochemical functions of ascorbic acid [J]. Annual Review of Nutrition, 1986, 6(1): 365-406
- [24] 潘超然,鲍世利,陈锦权.锥栗贮藏过程维生素C的降解速率以及保鲜条件研究[J].农业工程学报,2003,19(6):234-237
PAN Chao-ran, BAO Shi-li, CHEN Jin-quan. Degradation rate of vitamin C in storage of *castanea henryi* and storage conditions [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 234-237