

高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对杏鲍菇谷氨酸代谢的影响

胡花丽, 王毓宁, 张雷刚, 李鹏霞

(江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 谷氨酸属于杏鲍菇中的鲜味氨基酸, 为探讨高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对杏鲍菇谷氨酸代谢的影响, 以空气气体比例为对照 (CK), 用不同的气体组分[CA1 (2% O₂)、CA2 (2% O₂+10% CO₂)、CA3 (2% O₂+30% CO₂)、CA4 (2% O₂+50% CO₂)]对杏鲍菇进行气调处理, 研究了贮藏期间菇体丙二醛含量及抗氧化酶活性的变化, 结合聚类分析表明 CA3 (2% O₂+30% CO₂) 处理对减缓采后杏鲍菇的衰老具有重要的作用。进一步分析了 CA3 处理对杏鲍菇表型、呼吸速率、游离氨基酸含量、味觉变化及蛋白酶、谷氨酸合酶 (GOGAT)、脯氨酸脱氢酶 (PRODH) 和谷氨酸脱氢酶 (GDH) 活性的影响。结果表明, 较对照相比, CA3 处理降低了采后杏鲍菇的呼吸速率, 增加了其总游离氨基酸及谷氨酸含量, 从而维持了菇体的滋味品质; 另外, 该 CA3 处理抑制了采后杏鲍菇蛋白酶、GOGAT、PRODH 和 GDH 的活性。可见, 2% O₂ + 30% CO₂ 贮藏可维持采后杏鲍菇的鲜味特征, 该作用与其抑制 GDH 的活性有关。

关键词: 杏鲍菇; 气调贮藏; 衰老; 谷氨酸; 谷氨酸脱氢酶

文章编号: 1673-9078(2016)6-136-141

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.6.022

Effects of Storage in High Carbon Dioxide and Low Oxygen on Glutamic Acid Metabolism in *Pleurotus eryngii*

HU Hua-li, WANG Yu-ning, ZHANG Lei-gang, LI Peng-xia

(Institute of Agro-product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Glutamic acid is a flavorful amino acid in *Pleurotus eryngii*. To explore the effect of high carbon dioxide and low oxygen storage on glutamic acid metabolism in *Pleurotus eryngii* postharvest, samples were stored in a controlled atmosphere using different gas compositions (CA1 (2% O₂), CA2 (2% O₂ + 10% CO₂), CA3 (2% O₂ + 30% CO₂), CA4 (2% O₂ + 50% CO₂), and a normal air gas ratio was used as the control (CK, 20.9% O₂ + 0.04% CO₂). The malondialdehyde content and antioxidant activity of *Pleurotus eryngii* were studied over time in storage. The results in combination with clustering analysis showed that CA3 (2% O₂ + 30% CO₂) treatment played an important role in alleviating the senescence of *Pleurotus eryngii* postharvest. The effects of CA3 treatment on the phenotype, respiration rate, free amino acid content, and taste change, as well as the activities of protease, glutamate synthase (GOGAT), proline dehydrogenase (PRODH), and glutamate dehydrogenase (GDH) in *Pleurotus eryngii* were analyzed. The results indicated that compared with the control, CA3 treatment decreased the respiration rate and increased the content of total free amino acids and glutamic acid, thereby maintaining the taste characteristics. In addition, CA3 treatment inhibited the activities of protease, GOGAT, PRODH, and GDH. Therefore, storage at 2% O₂ + 30% CO₂ could maintain the umami characteristics of *Pleurotus eryngii* postharvest, and this effect is associated with the inhibition of GDH activity.

Key words: *Pleurotus eryngii*; controlled atmosphere storage; senescence; glutamic acid; glutamate dehydrogenase

杏鲍菇作为一种近年来新培育的食用菌, 因其蛋白质含量高, 氨基酸种类齐全, 味道鲜美, 因而备受国内外消费者青睐。然在常温下, 杏鲍菇表面极易发

收稿日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金 (31301583); 江苏省农业科技自主创新资金 (Gx(14)2119)

作者简介: 胡花丽 (1980-), 女, 博士生, 副研究员, 研究方向: 果蔬采后生理研究

通讯作者: 李鹏霞 (1976-), 女, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向: 果蔬采后生理研究

生褐变, 且品质劣变很快。因此, 研究杏鲍菇采后安全、有效的保鲜技术显得尤为重要。目前多种采后处理技术, 例如: 薄膜气调包装^[1]、化学处理方法^[2]及辐照处理^[3]已被广泛用于各种食用菌, 以解决其采后腐烂、货架期短及品质劣变的问题。事实上, 除了这些常规品质特性的变化外, 杏鲍菇特有的风味也在采后过程中出现衰败。

通常, 食用菌的风味包括滋味和香味, 香味主要由挥发性八碳化合物、含硫化合物以及醛酮酯类等构成, 而滋味主要由一类可溶的、相对分子质量较低

的化合物体现,如一些游离氨基酸、核苷酸及碳水化合物等,食用菌之所以味道鲜美是源于其含有鲜味活性成分,游离氨基酸就是其中一类重要的活性成分。根据氨基酸在食用菌中所呈现味道的差异,氨基酸被分为鲜味氨基酸,甜味氨基酸,苦味氨基酸和无味氨基酸。张忠等^[4]研究显示天冬氨酸和谷氨酸是食用菌中的鲜味氨基酸,对食用菌的鲜味起关键作用。另有研究表明谷氨酸的鲜度大约是天冬氨酸的13倍,所以在二者含量差别不大的情况下,谷氨酸对食用菌的鲜味起主要作用^[5]。另外,谷氨酸也是生物体氮与碳代谢过程中的关键氨基酸,其含量变化对生物体的物质代谢与能量转化均有重要影响。谷氨酸合酶(Glutamate synthase, GOGAT),谷氨酰胺合成酶(Glutamine synthetase, GS),蛋白酶,脯氨酸脱氢酶(Poline dehydrogenase, RODH)等可促使生物体内谷氨酸的积累,而谷氨酸的降解主要受谷氨酸脱氢酶(Glutamate dehydrogenase, GDH)调节^[6]。因此,这两种生物过程通过协同作用调控组织内谷氨酸的积累。

近年来已有一些关于谷氨酸合成代谢的报道。例如:Robredo等^[7]研究证明了高浓度的CO₂环境可提升大麦植株谷氨酸及谷氨酰胺的合成效率。然而至目前,气调贮藏对采后杏鲍菇谷氨酸代谢的影响规律尚不明确。Amodio等^[8]研究表明杏鲍菇对CO₂具有较高的耐性,3% O₂+20% CO₂气调贮藏可维持杏鲍菇采后较高的品质。我们前期的研究也揭示了高浓度CO₂气调贮藏有利于延缓采后杏鲍菇的衰老^[9]。因此,本研究进一步探索了高浓度CO₂结合低O₂气调贮藏对采后杏鲍菇谷氨酸代谢的影响,以期从非挥发性风味物质代谢的角度探明气调贮藏对杏鲍菇鲜味品质的影响规律。

1 材料与方法

1.1 试验材料

杏鲍菇采自江苏省兴化市天弘食用菌有限公司,采收后立即运至实验室,挑选大小、形状、颜色、成熟度基本一致的杏鲍菇为试验材料。

将杏鲍菇装入21 L的气调保鲜箱,每箱装50个杏鲍菇,每处理为三箱,箱子通过三通阀并联连接后连续通入混合气体(南京特气厂生产),气体流速为10 L/h,出气口连接大气。混合气体比例分别为:CK-20.9% O₂+0.04% CO₂, CA1-2% O₂, CA2-2% O₂+10% CO₂, CA3-2% O₂+30% CO₂, CA4-为85%~95%,贮藏期间每天取样1次,每次分别从每个

气调箱随机取8个杏鲍菇,共取24个杏鲍菇用于丙二醛含量及抗氧化酶活性的测定。

进一步以上述试验筛选的适宜气体成分为处理,在相同的贮藏条件下分析该气调贮藏对采后杏鲍菇表型、呼吸速率、游离氨基酸含量、味觉变化及谷氨酸合成酶[蛋白酶、谷氨酸合酶(GOGAT)、脯氨酸脱氢酶(PRODH)]和谷氨酸降解酶[谷氨酸脱氢酶(GDH)活性]的影响。

1.2 指标测定

1.2.1 丙二醛(MDA)含量的测定

参考Li等^[9]的方法略有修改,将1.0 mL上清液加入3.0 mL 0.5%的硫代巴比妥酸(TBA,用20%的三氯乙酸配成)溶液中,混匀后在沸水浴中煮沸20 min,迅速用自来水冷却并在10000 r/min下离心10 min。取上清液在450、532和600 nm波长下分别测定光密度值,重复3次,并按下公式计算MDA含量。

$$\text{MDA 含量} (\mu\text{mol/g}) = [6.45 (\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56\text{OD}_{450}] \times V \times (A/a) / W$$

式中,A为反应液总量(4 mL);V为提取液总量; a为测定提取液量(1.0 mL);W为材料重(g)。

1.2.2 超氧化物歧化酶(SOD)的测定

采用氮蓝四唑比色法^[11]。

1.2.3 过氧化氢酶(CAT)活性的测定

采用参考Amodio等^[8]的方法。

1.2.4 呼吸速率的测定

将24个杏鲍菇称重后均匀置于3个10 L密封盒中,1 h后取气,然后用气相色谱仪(安捷伦7820型气相色谱,色谱条件:FID检测器,柱温70 °C,转化炉温度375 °C, N₂压力0.4 MPa, H₂压力0.3 MPa,空气压力0.5 MPa)测定,重复3次,外标法定量。

1.2.5 游离氨基酸的测定

取20 g样品置于烘箱中,于60 °C下烘干至完全脱水^[10]。取0.1 g干燥后的样品粉末并加入0.1 mol/L盐酸提取剂,充分搅拌使游离氨基酸溶解,过滤溶液并收集上清液。向沉淀中加入适量去离子水,充分搅拌。将上述提取过程重复三次,收集三次所得上清液并混合,定容摇匀,上清液使用全自动氨基酸分析仪测定,游离氨基酸含量以mmol/100 g DW表示。

1.2.6 电子舌数据采集

采用Alpha M.O.S公司的ASTREE电子舌检测系统进行数据的采集。将80 mL杏鲍菇汁备用液倒入容量为100 mL的烧杯中,数据采集序列为清洗液(蒸馏水)和待测杏鲍菇汁交替进行,为使传感器响应值趋于平稳,每个样品数据采集时间为150 s,每隔1 s

采集一个数据。为减少测量误差,实验取最后 20 s 测量值的平均值作为各传感器的后续处理数据,数据分析前对所有数据进行标准化处理。

1.2.7 蛋白酶活性的测定

参照张忠等^[4]方法,略有改进。将适量样品液与 1 mL 0.5%酪素溶液混合摇匀,置于 30 °C 水浴中保温 20 min,保温结束向反应液中加入 20%三氯乙酸,静置 10 min,加入 0.4 mol/L 的 Na₂CO₃ 与福林试剂。将反应液置于 30 °C 水浴中显色 20 min,于 660 nm 处测吸光值,计算酶活性,以 U/g FW 表示。

1.2.8 谷氨酸合酶(GOGAT),脯氨酸脱氢酶(PRODH),脯氨酸脱氢酶(PRODH)和谷氨酸脱氢酶(GDH)活性的测定

参考文献^[6]的方法,酶活性以 U/g FW 表示。

1.3 数据分析

数据为重复的平均值±标准误。所有数据用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,采用 *t*-test 和 ANOVA 进行邓肯氏多重差异分析 (*p*<0.05)。

2 结果分析

2.1 不同气体比例贮藏对杏鲍菇 MDA 含量、SOD 活性和 CAT 活性的聚类分析

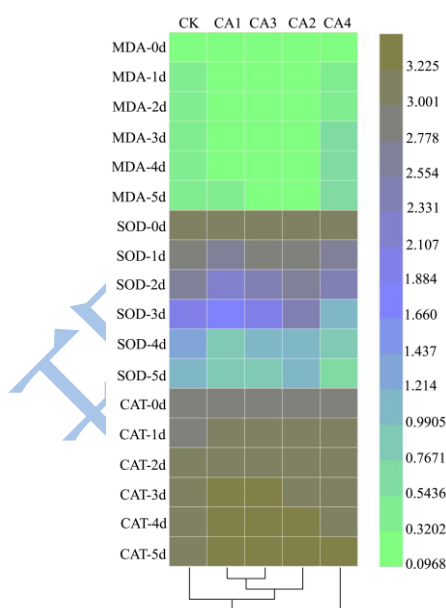


图 1 热图显示杏鲍菇 MDA 含量、SOD 活性和 CAT 活性的变化

Fig.1 Heat map showing changes in MDA content and the activities of SOD and CAT in *Pleurotus eryngii*

由图 1 可看出,基于 MDA 含量、SOD 活性和 CAT 活性,通过聚类分析将杏鲍菇生理状态分为 4 层

次,其中 CA1 和 CA3 处理为第一层,然后与 CA2 合并为第二层,再次与 CK 合并为第三层,最后与 CA4 合并为第四层。可见,气调处理对杏鲍菇采后膜脂氧化水平、SOD 活性和 CAT 活性产生了影响。总体看来,较 CK 相比,CA1(2% O₂)、CA2(2% O₂+10% CO₂) 和 CA3(2% O₂+30% CO₂) 处理减缓了杏鲍菇的膜脂氧化程度,其中 CA2 和 CA3 的作用更理想,而 CA4 处理(2% O₂+50% CO₂) 则加重了菇体的膜脂氧化水平,说明过高的 CO₂ 可能对杏鲍菇产生了伤害。结合聚类分析和膜脂氧化的结果,表明 CA3 处理对减缓采后杏鲍菇的衰老具有更好的作用。因此,进一步分析了 CA3(2% O₂+30% CO₂) 这种高 CO₂ 和低 O₂ 气调贮藏对采后杏鲍菇谷氨酸代谢的影响。

2.2 高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对采后杏鲍菇表型的影响

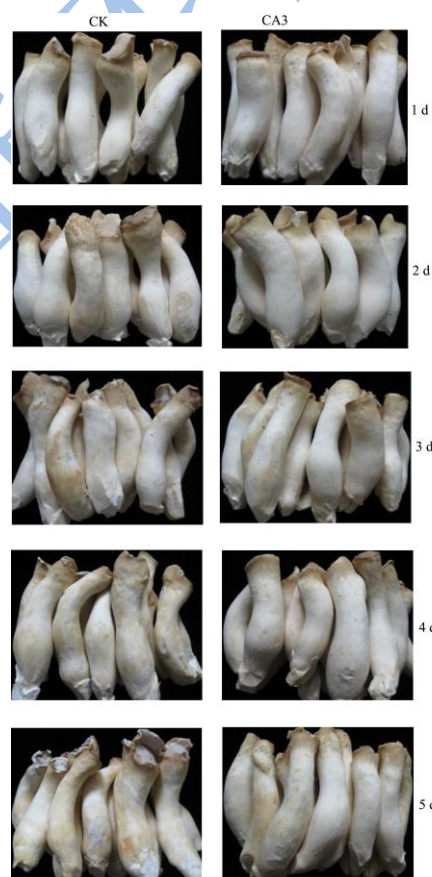


图 2 CA3 处理对采后杏鲍菇表型的影响

Fig.2 Effect of CA3 treatment on the phenotype of *Pleurotus eryngii*

由图 2 可看出,随着贮藏时间的延长,无论是 CK 还是 CA3 处理杏鲍菇菇体均发生衰老迹象。然而,CK 组的杏鲍菇从第 2 d 开始即表现出衰老的特征,例如其部分菇体的菌柄出现腐烂;贮藏第 3 d 时,除了

腐烂症状外, CK 组菇体的菌柄、菌盖表明出现些许菌丝的生长; 贮藏至 5 d 时, 这种菌丝的生长已清晰可见, 此时菇体已丧失食用价值。相比而言, CA3 处理在一定程度上抑制了采后杏鲍菇的腐烂和菌丝的生长, 从而较好的维持了菇体的品质。

2.3 高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对采后杏鲍菇呼吸强度的影响

呼吸速率过高会加速果蔬新鲜度下降, 促使其营养物质消耗, 品质劣变。因此, 我们首先分析了采后杏鲍菇呼吸速率的变化特点。如图 3 所示, 贮藏初期 (0 d) 杏鲍菇的呼吸速率为 284.50 mg CO₂/kg/h; 贮藏 1 d 时, CK 组菇体的呼吸速率快速上升到峰值 1091.02 mg CO₂/kg/h, 从贮藏第 2 d 开始, 其呼吸速率又迅速下降; 贮藏至 5 d 时, 其呼吸速率为 393.96 mg CO₂/kg/h, 仅为呼吸峰值的 36.11%。与之不同, CA3 组杏鲍菇的呼吸速率在贮藏第 1 d 时迅速下降到 41.12 mg CO₂/kg/h, 且在贮藏第 2 d~4 d 基本保持不变, 至贮藏第 5 d 时略有上升, 尽管如此, 该值仍然显著低于 CK ($p < 0.05$)。可见, 高 CO₂ 结合低 O₂ 的气调贮藏显著降低了采后杏鲍菇的呼吸速率。

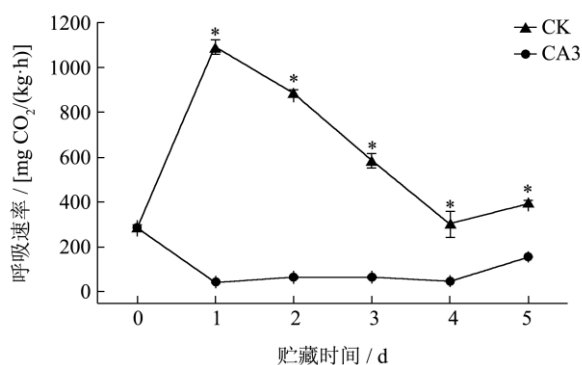


图 3 高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对杏鲍菇呼吸速率的影响

Fig.3 Effect of high carbon dioxide and low oxygen storage on the respiration rate of *Pleurotus eryngii*

2.4 高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对采后杏鲍菇游离氨基酸含量的影响

基于游离氨基酸对食用菌鲜味特征的作用, 进一步分析了高 CO₂ 结合低 O₂ 组合对贮藏 5 d 杏鲍菇游离氨基酸含量的影响。如表 1 所示, CK 组杏鲍菇的总游离氨基酸略有下降, 但与贮藏初期无显著差异; 然而, CA3 处理组杏鲍菇的总游离氨基酸含量显著增加 ($p < 0.05$)。另外, CA3 组杏鲍菇中谷氨酸的含量 (27.42 mmol/100 g DW) 显著高于 CK 的值 (14.21

mmol/100g DW)。

表 1 CA3 处理对杏鲍菇游离氨基酸含量的影响

Table 1 Effect of CA3 treatment on the content of free amino acids in *Pleurotus eryngii*

氨基酸组成	含量/(mmol/100g DW)		
	0 d	5d (CK)	5d CA3)
L-天冬氨酸	8.94±0.08 ^b	5.63±0.00 ^a	13.67±0.15 ^c
L-苏氨酸	24.77±0.17 ^a	25.02±0.08 ^a	29.47±0.17 ^b
L-丝氨酸	16.56±0.10 ^b	15.51±0.10 ^a	18.36±0.10 ^c
L-谷氨酸	22.84±0.14 ^b	14.21±0.07 ^a	27.41±0.27 ^c
甘氨酸	10.52±0.00 ^b	11.45±0.13 ^c	9.05±0.00 ^a
L-丙氨酸	36.48±0.22 ^a	35.58±0.34 ^a	42.43±0.22 ^b
L-胱氨酸	0.33±0.00 ^b	2.21±0.04 ^c	0.21±0.00 ^a
L-缬氨酸	17.51±0.09 ^a	18.36±0.09 ^b	16.99±0.17 ^a
L-蛋氨酸	3.22±0.00 ^c	2.14±0.00 ^a	2.95±0.00 ^b
L-异亮氨酸	10.21±0.08 ^c	9.91±0.08 ^b	9.45±0.08 ^a
L-亮氨酸	16.08±0.08 ^c	15.42±0.08 ^b	14.48±0.15 ^a
L-酪氨酸	4.03±0.00 ^a	4.19±0.00 ^b	5.13±0.06 ^c
L-苯丙氨酸	12.29±0.06 ^a	13.14±0.00 ^b	15.19±0.12 ^c
L-赖氨酸	16.28±0.07 ^b	11.42±0.07 ^a	16.35±0.21 ^b
L-组氨酸	3.93±0.03 ^b	3.87±0.05 ^b	3.74±0.06 ^a
L-精氨酸	14.52±0.23 ^b	27.32±0.63 ^c	10.33±0.06 ^a
L-脯氨酸	15.38±0.17 ^b	12.16±0.09 ^a	18.51±0.09 ^c
总量	243.30±0.06 ^a	234.59±0.05 ^a	267.80±0.08 ^b

2.5 电子舌的结果

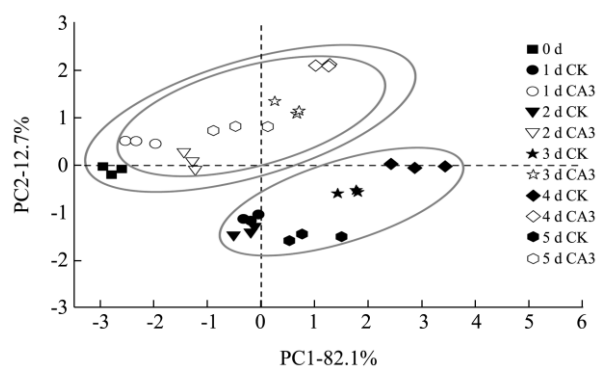


图 4 CK 和 CA 处理杏鲍菇的电子舌数据主成分得分图

Fig.4 PCA score plot for electronic tongue data from *Pleurotus eryngii* stored in controlled atmosphere vs. normal air atmosphere

同时我们采用电子舌技术进一步分析了采后杏鲍菇味觉的变化。图 4 显示 PC1 和 PC2 分别为 82.1% 和 12.7%, 表明前两个主成分的累积贡献率为 94.8%, 基本涵盖了原始数据的绝大部分信息。CK 和 CA3 处理杏鲍菇的结果明显地分散在前两个主成分构成的二维坐标空间中, 其中 CK 处理杏鲍菇的结果基本位于

第一主成分的下半区,而 CA3 处理的结果则位于第一主成分的上半区,且该结果与 0 d 可聚为一类,说明 CA3 处理可较好的维持杏鲍菇固有的滋味特性,结合图 2 的结果表明采后杏鲍菇的衰老程度影响其滋味特征。

2.6 高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对采后杏鲍菇蛋白酶活性的影响

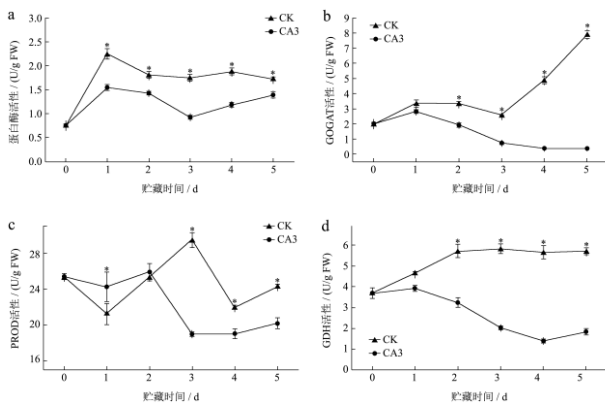


图 5 高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏对杏鲍菇蛋白酶 (a)、GOGAT (b)、PRODH (c) 及 GDH (d) 活性的影响

Fig.5 Effect of high carbon dioxide and low oxygen storage on the activity of protease (a), GOGAT (b), PRODH (c), and GDH (d) in *Pleurotus eryngii*

蛋白酶主要催化蛋白质水解成游离氨基酸。在以上基础上,我们首先分析了杏鲍菇组织内蛋白酶活性的变化。图 5a 表明,CA3 组杏鲍菇的蛋白酶活性在贮藏第 1 d 时迅速升高,在第 2 d 略微下降,之后再次表现出升高的趋势;并在第 3 d~5 d 基本保持不变。相比而言,在贮藏的前 3 d,CK 组杏鲍菇中蛋白酶活性变化与 CA3 相似,然在贮藏后期,CK 组杏鲍菇的蛋白酶活性略有下降。尽管如此,整个贮藏期内,CA3 组杏鲍菇的蛋白酶活性均显著低于 CK ($P < 0.05$)。

GOGAT 可促使谷氨酰胺向谷氨酸的转变。进一步分析了采后杏鲍菇中 GOGAT 活性的变化。由图 5b 可看出,贮藏前期 (0 d~1 d 内),CA3 组杏鲍菇的 GOGAT 活性稍有增加,之后呈现下降的趋势。比较看来,在贮藏的前 3 d,CK 组杏鲍菇中 GOGAT 活性的变化与 CA3 一致,然在贮藏 3 d 后,CK 组杏鲍菇的 GOGAT 活性急剧增加,且显著高于 CA3 组。

PRODH 活性的增加可促使脯氨酸向谷氨酸的转变。由图 5c 可看出,在贮藏的前 2 d,处理和对照菇体中 PRODH 活性之间无显著差异。然而在贮藏 2 d 之后,CA3 贮藏杏鲍菇中的 PRODH 活性则显著低于 CK。

由图 5d 可看出,CA3 贮藏杏鲍菇的 GDH 活性自贮藏 1 d 后迅速下降至第 4 d,之后略有上升;与之不同,CK 组杏鲍菇的 GDH 活性在贮藏的前 2 d 明显增加,之后维持在稳定的水平。在贮藏 1 d、2 d、3 d、4 d 和 5 d 时,CA3 组杏鲍菇的 GDH 活性均显著低于 CK,分别为 CK 的 84.05%、56.80%、34.65%、24.59%、32.26%。说明该高 CO₂ 结合低 O₂ 贮藏有效抑制了 GDH 的活性。

3 讨论

果蔬产品经过采收后仍在进行呼吸以维持其基本生命状态,但由于脱离了母体环境,同化作用趋于停止,一般是分解代谢占主导。谷氨酸作为一种生物体内普遍存在的氨基酸,是氮代谢中枢物质,其含量变化与许多因素有关。首先,蛋白质可在蛋白酶的作用下发生降解,引起包括谷氨酸在内的游离氨基酸含量升高。吴岚芳等^[11]对芒果进行人工气调贮藏,发现 86% N₂+4% O₂+10% CO₂ 可以显著抑制果肉蛋白质的降解,延缓其衰老。同样,本研究表明 CA3 组显著抑制了采后杏鲍菇蛋白酶的活性,说明 CA3 组杏鲍菇中蛋白质向游离氨基酸转化能力小于 CK,但在贮藏第 5 d 时,CA3 处理组杏鲍菇的谷氨酸含量显著高于 CK (表 1),说明谷氨酸的含量还受其他因素影响。

谷氨酸的另一重要来源是 GS/GOGAT (谷氨酰胺合成酶/谷氨酸合成酶) 循环。GS 催化谷氨酰胺的合成,具体是催化铵与一分子谷氨酸发生合成反应;GOGAT 催化谷氨酰胺分解生成谷氨酸的反应^[6]。本研究中,CA3 组杏鲍菇的 GOGAT 活性低于 CK,说明 CA 组菇体内谷氨酰胺分解程度低于 CK,生成相应谷氨酸的含量少于 CK。此外,CA3 与 CK 的 GS 活性均较低且差异不显著 (数据未列出),说明采后杏鲍菇的贮藏中,氮的同化与积累作用趋于停止,菇体内的含氮化合物代谢主要朝着分解方向进行。

当机体碳源缺乏时,有可能会分解氨基酸以获得碳骨架来补偿三羧酸循环所需的糖类物质,而脯氨酸正是这样一种能被机体快速利用的氨基酸,PRODH 在催化脯氨酸降解为谷氨酸的反应中起关键作用^[6]。Natarajan 等在黑色素瘤 WM35 细胞中的研究表明,RPODH 活性上升会促进脯氨酸分解产生谷氨酸^[12]。本研究中,CA3 组菇体中的 PRODH 活性显著低于 CK,说明 CA3 组菇体内脯氨酸转化为谷氨酸的量小于 CK。其可能的原因有:① NADH 与 NAD⁺ (PRODH 酶的辅基) 的相互转化在低氧环境中受到抑制^[13],进而影响了 PRODH 的活性;② 菇体整体代谢速率受到 CA3 的抑制而始终保持较低水平,使得碳源的消耗量

较低,不需要降解大量的脯氨酸来提供呼吸底物; 3脯氨酸作为一种保护性氨基酸,具有清除羟基自由基,调节细胞渗透压,抑制蛋白降解的作用,脯氨酸越多,机体抗性越强。结合图1和2的结果表明CA3组杏鲍菇的衰老程度明显低于CK,所以推测CA组杏鲍菇中较高的脯氨酸含量,有利于提高杏鲍菇对不良环境的抵抗能力,延长菇体的采后寿命。

蛋白酶、GOGAT、GS和PRODH活性的变化主要与谷氨酸的生物合成有关,综合CA3贮藏对杏鲍菇蛋白酶、GOGAT和PRODH活性的影响可看出,CA3处理在不同程度上降低了这些酶的活性,说明该高CO₂结合低O₂贮藏杏鲍菇中谷氨酸的合成速率弱于对照组。事实上,CA3组杏鲍菇中的谷氨酸含量显著高于对照(表1)。因此,我们进一步分析了谷氨酸降解关键酶(GDH)活性的变化,结果发现GDH活性在高CO₂结合低O₂氧环境中可受到抑制。Ardo^[13]等也发现低氧环境降低了GDH的活性。另外,Lehmann和Ratajczak指出,合成与分解途径的协调作用最终决定谷氨酸的含量^[14]。本研究结果表明,与合成代谢相比,采后杏鲍菇中谷氨酸的积累更多的受制于其分解速率的影响。

4 结论

为探讨高浓度二氧化碳结合低浓度氧对采后杏鲍菇鲜味品质的影响,本文研究了2% O₂+30% CO₂贮藏对采后杏鲍菇谷氨酸代谢的影响。结果表明,2% O₂+30% CO₂贮藏可抑制采后杏鲍菇的呼吸速率,并可通过抑制谷氨酸脱氢酶活性而降低谷氨酸的分解速率,从而维持菇体内谷氨酸的水平,进而维持了菇体较好的滋味品质。

参考文献

- [1] 胡花丽,李鹏霞,王毓宁.不同薄膜包装对杏鲍菇采后衰老生理的影响[J].食品与发酵工业,2012,7:196-200
HU Hua-li, LI Peng-xia, WANG Yu-ning. Effects of different film packaging on the postharvest senescence physiology of *Pleurotus eryngii* [J]. Food and Fermentation Industries, 2012, 7: 196-200
- [2] Bennan M, Le P, Gormley R. Post-harvest treatment with citric acid or hydrogen peroxide to extend the shelf life of fresh sliced mushrooms [J]. LWT - Food Science and Technology, 2000, 33: 285-289
- [3] Akram K, Ahn J J, Yoon S R, et al. Quality attributes of *pleurotus eryngii* following gamma irradiation [J].

Postharvest Biology and Technology, 2012, 66: 42-47

- [4] 张忠,谷镇,杨焱,等.3种野生食用菌干品的鲜味评价[J].食品科学,2013,21:51-54
ZHANG Zhong, GU Zhen, YANG Yan, et al. Elvaluation of the umami taste of three species of dried wild edible fungi [J]. Food Science, 2013, 21: 51-54
- [5] Liu P, Li H M, Tang Y J. Comparison of free amino acids and 5'-nucleotides between Tuber fermentation mycelia and natural fruiting bodies [J]. Food Chemistry, 2012, 132: 1413-1419
- [6] Nishiwaki T, Hayashi K. Purification and characterization of an aminopeptidase from the edible basidiomycete *Grifola frondosa* [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2001, 65: 424-427
- [7] Robredo A, Perez-Lopez U, Miranda-Apodaca J, et al. Elevated CO₂ reduces the drought effect on nitrogen metabolism in barley plants during drought and subsequent recovery [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 71: 399-408
- [8] Amodio M L, Colelli G. Controlled-atmosphere storage of fresh-cut 'Cardoncello' mushrooms (*Pleurotus eryngii*) [J]. Acta Horticulturae, 2003, 599: 731-735
- [9] Li P X, Zhang X, Hu H L, et al. High carbon dioxide and low oxygen storage effects on reactive oxygen species metabolism in *pleurotus eryngii* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 141-146
- [10] Mau J L, Lin H C, Ma J T, et al. Non-volatile taste components of several speciality mushrooms [J]. Food Chemistry, 2001, 73: 461-466
- [11] 吴岚芳,黄绵佳,李绍鹏.气调贮藏对芒果保鲜效果的研究[J].食品科学,2008,12:705-707
WU Lan-fang, HUANG Mian-jia, LI Shao-peng. Effects of controlled atmosphere storage on mango fruit preservation [J]. Food Science, 2008, 12: 705-707
- [12] Natarajan S K, Zhu W D, Liang X W, et al. Proline dehydrogenase is essential for proline protection against hydrogen peroxide-induced cell death [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2012, 53: 1181-1191
- [13] Ardo Y. Flavour formation by amino acid catabolism [J]. Biotechnology Advances, 2006, 24: 238-242
- [14] Lehmann T, Ratajczak L. The pivotal role of glutamate dehydrogenase (GDH) in the mobilization of N and C from storage material to asparagine in germinating seeds of yellow lupine [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165: 149-158