

初始氧气体积分数对采后双孢蘑菇品质的影响

唐建新, 秦苏怡, 任浩, 于官楚, 辛广, 孙炳新

(沈阳农业大学 食品学院, 沈阳 110866)

摘要: **目的** 研究初始氧气体积分数(5%, 10%, 21%, 50%, 75%)对采后双孢蘑菇品质的影响。**方法** 将采后的双孢蘑菇迅速用5 $\mu\text{L/L}$ 的1-甲基环丙烯熏蒸12 h,经不同初始氧气体积分数气调包装后,置于3 $^{\circ}\text{C}$ 的低温培养箱中贮藏,研究其在贮藏期间各项品质指标的变化情况(包括 O_2 和 CO_2 的体积分数、质量损失率、质构等特性,酸、甜、苦、咸和鲜等5种味觉指标,呈味核苷酸、色泽等)。**结果** 蘑菇的呼吸作用使包装内部 O_2 和 CO_2 体积分数变化剧烈, O_2 快速消耗, CO_2 逐渐上升;高氧处理组的蘑菇硬度均高于14 N,高出低氧处理组27.36%;各处理组的风味核苷酸含量相比其它种类核苷酸含量均处于中等水平,其中体积分数为50%的高氧组风味核苷酸的损失率最低为10.32%,其他4组的损失率则高达18.44%~26.47%;此外,高氧和低氧处理均能在一定程度上抑制酶促褐变,所有处理组的亮度值较贮藏前的下降率均低于6.78%,其中低氧处理对褐变的延缓效果更好,5%处理组的褐变指数在贮藏后期最低,褐变指数为28.82,比对照组低12.85%。**结论** 双孢蘑菇的呼吸强度与初始氧气体积分数呈线性相关,在贮藏期间的品质变化与初始氧气体积分数也密切相关。高氧气调更有利于维持双孢蘑菇的硬度、风味核苷酸和鲜味水平,综合而言,50%处理组效果较好;高氧和低氧处理均能对酶促褐变的多酚氧化酶有抑制作用,使蘑菇保持较好的亮度值,并延缓贮藏期间蘑菇的褐变,其中低氧处理抑制褐变效果优于高氧和对照处理组。

关键词: 双孢蘑菇;高氧气调;低氧气调;品质

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)01-0008-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.01.002

Effect of Initial Oxygen Concentration on Quality of *Agaricus Bisporus*

TANG Jian-xin, QIN Su-yi, REN Hao, YU Guan-chu, XIN Guang, SUN Bing-xin

(College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of different initial O_2 concentrations (5%, 10%, 21%, 50%, 75%) on quality of *agaricus bisporus*. The *agaricus bisporus* was quickly fumigated with 5 $\mu\text{L/L}$ of 1-MCP for 12 h after being harvested, and then stored in incubator at 3 $^{\circ}\text{C}$ after MAP with different initial oxygen concentrations. Its O_2 and CO_2 concentrations, weight loss, texture, sourness, sweetness, bitterness, saltiness and umamiduring storage were measured. The changes on its nucleotides, color and other quality indexes were measured. The respiration of mushrooms made the O_2 and CO_2 concentrations inside the package change drastically. O_2 was rapidly consumed, and CO_2 gradually increased; the firmness of mushrooms in the high- O_2 treatment group remained above 14 N, which was 27.36% higher than that in the low- O_2 treatment group; the contents of flavor nucleotides were all in the medium range. 50% high- O_2 treatment group had the lowest loss rate of flavor nucleotides

收稿日期: 2020-05-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0400200); 辽宁省科学研究经费项目(LSNQN201918)

作者简介: 唐建新(1995—),女,沈阳农业大学硕士生,主攻食用菌保鲜技术。

通信作者: 孙炳新(1981—),男,博士,沈阳农业大学副教授,主要研究方向为食品包装与货架寿命。

(10.32%), and that of the other four groups ranged from 18.44% to 26.47%. In addition, both high and low-O₂ treatment groups could inhibit enzymatic browning to a certain extent. Compared with day 0, the brightness values were all lower than 6.78%. Low-O₂ treatment group especially had a better effect on delaying browning. The browning index of the 5% treatment group was 28.82, which the lowest in later storage, and was 12.85% lower than that of the control group. The respiration intensity of *agaricus bisporus* linearly related to the initial O₂ concentration, and the quality is also closely related to the O₂ concentration inside the MAP. High-O₂ treatment is more conducive to maintain the firmness, the level of flavor nucleotide and umami taste. In summary, 50% treatment group has good effect. Both high-O₂ treatment and low-O₂ treatment groups can inhibit the enzymatic browning of polyphenol oxidase to keep the mushrooms with good brightness and delay the browning of mushroom in storage, and the effect of low-O₂ treatment is better than high-O₂ and control treatment.

KEY WORDS: *agaricus bisporus*; high O₂ MAP; low O₂ MAP; quality

双孢蘑菇(也称纽扣蘑菇或白蘑菇)是世界上栽培量最多的食用菌之一,具有丰富的食用价值和药用价值^[1],深受消费者欢迎。双孢蘑菇采后品质劣变迅速,易出现褐变、质量损失、色泽暗淡、硬度下降等现象^[2],给贮藏和销售带来很大困扰,因此采用适当的包装贮运技术来延长其货架寿命,并研究贮藏期间的品质变化显得意义重大。

双孢蘑菇采后发生品质劣变的主要原因是其呼吸强度高,新陈代谢旺盛,导致自身营养物质的快速消耗和有害物质的产生。低温贮藏作为一种常用的基本贮藏保鲜方法,多结合气调包装、化学或物理防腐、减压贮藏等技术^[1]以减缓呼吸强度,并延迟果蔬的成熟衰老过程^[2],达到保证贮藏质量,延长货架寿命的目的。目前,不同氧气体积分数的气调包装广泛应用于生鲜农产品的贮藏,根据相关文献报道,低氧和高氧气调均可以维持食用菌的颜色^[3]和营养物质^[4],并对双孢蘑菇相关的生理和生化活性产生一定影响^[5];低氧气调可以降低双孢蘑菇的呼吸强度,减少蘑菇代谢,抑制褐变发生^[6],延缓质量损失和菇体软化进程,保持高固形物含量,并延长蘑菇的货架期^[7]。由于包装膜的渗透性,贮藏期间难以维持合适的低氧环境,以达到预期的贮藏品质;高氧气调可抑制双孢蘑菇酶促褐变,降低贮藏期间蘑菇的呼吸速率,防止厌氧发酵反应发生,减缓硬度^[8]、颜色和香气的变化^[9-10],抑制微生物生长及其对细胞膜的损伤^[11],减少抗坏血酸并维持总糖含量^[12]。由此可见,氧气体积分数与蘑菇的品质变化密切相关,考察初始氧气体积分数对双孢蘑菇品质的影响具有积极作用。

1-甲基环丙烯(1-Methylcyclopropene, 1-MCP)是一种果蔬保鲜领域应用较为广泛的乙烯抑制剂。相关研究表明,通过1-MCP熏蒸处理可以使草菇菇盖^[13]、杏鲍菇^[14]的褐变度降低,保证其贮藏期间的品质,在一定程度上对延长果蔬货架期起到积极作用^[15]。由此,文中拟通过使用1-MCP熏蒸预处理,探究初始氧气体积分数对双孢蘑菇贮藏期间品质变化的影响,以期对双孢蘑菇的贮藏提供借鉴。

1 实验

1.1 材料与设备

主要实验材料:双孢蘑菇,辽宁峪程菌业有限公司;PP(聚丙烯)盒,尺寸为223 mm×133 mm×40 mm;高阻隔性PA/PE(聚酰胺/聚乙烯)复合膜,厚度为69.2 μm,透水率为5.55 g/(m²·24 h),透氧率为68.218 cm³/(m²·24 h·0.1 MPa),CO₂透过率为30.645 cm³/(m²·4 h·0.1 MPa);1-MCP,咸阳西秦生物科技有限公司;5'-GMP、5'-IMP、5'-XMP和5'-AMP标准品,上海源叶生物科技有限公司;磺基水杨酸分析纯、磷酸二氢钾色谱纯和盐酸,天津市光复精细化工研究所;甲醇色谱纯,西陇科学股份有限公司。

主要实验设备:电子恒温电热套98-1-B型,天津市泰斯特仪器有限公司;顶空气体分析仪,丹麦Dansensor公司;超声波数控清洗器KQ-300D型,昆山市超声仪器有限公司;CT3质构仪,美国Brookfield公司;气调包装机T10,德国Multivac公司;InsetSA402B电子舌,日本Insent公司;台式微量高速离心机H1650-W/H1650W,长沙湘仪器有限公司;Waters60高效液相色谱,美国Waters公司;低温恒温培养箱MIR-254-PC,日本Panasonic公司。

1.2 方法

1.2.1 1-MCP熏蒸处理

挑选菌盖直径为(3.5±0.5)cm,形状均一,颜色洁白,无损伤的双孢蘑菇。参考文献[16—18]中的方法,将蘑菇迅速置于4℃、1-MCP体积分数为5 μL/L的密闭帐中熏蒸12 h,熏蒸的同时进行预冷,熏蒸结束后迅速将蘑菇放入保温箱带回实验室。

1.2.2 气调包装

参考文献[3,9—10,19]中的方法,将熏蒸后的双孢蘑菇分为5组进行实验。其中,高氧组:O₂和N₂按照体积分数分别为75%和25%混合(记为O₂(75%)组),O₂和N₂按照体积分数各占50%混合(记为

O₂(50%)组);低氧组:O₂和N₂按照体积分数分别为10%和90%混合(记为O₂(10%)组),O₂和N₂按照体积分数分别为5%和95%混合(记为O₂(5%)组);对照组:自然空气,O₂体积分数为21%(记为O₂(21%)组)。每组100 g左右,使用气调包装机T10进行气调包装后,将蘑菇放置于3℃的低温恒温培养箱(MIR-254-PC,日本)中进行贮藏。每个处理组均用PA/PE膜作为盖膜封装,设3个平行实验。

1.2.3 顶空气体

采用顶空气体分析仪Checkmate 3测定O₂和CO₂的体积分数。

1.2.4 质构分析

采用CT3质构仪进行测定。探针直径为0.5 mm,测试速度为1.5 mm/s,在菌盖中心位置测量,每组做5次平行实验,取其平均值。

1.2.5 质量损失率

通过称量贮藏期前后包装内蘑菇的质量来确定,表示为损失量相对于初始质量的百分比。计算公式为:

$$\text{质量损失率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

式中: m_1 为蘑菇的初始质量; m_2 为贮藏后质量。

1.2.6 电子舌

采用InsetSA402B电子舌进行测定。参考文献[20]中的方法并略作修改,将5 g蘑菇样品与100 mL纯水充分匀浆过滤后测定其指标。每隔6 d对双孢蘑菇的酸、甜、苦、咸和鲜等5种味觉指标进行测定。

1.2.7 5'-核苷酸定量测定

参考文献[21]中的方法略作修改,利用高效液相色谱仪Waters 60对双孢蘑菇的4种5'-核苷酸进行定量测定。HPLC系统选用磷酸二氢钾溶液为缓冲液,流速为1 mL/min,色谱柱为Ultimate AQ-C18(5 μm,

250 m×4.6 m),每隔6 d测定一次。

1.2.8 色泽

使用色差计测定蘑菇的 L , a , b 值,观察贮藏期间蘑菇的色度变化,测量时,每个实验组随机选取5个蘑菇,并在帽盖上随机选取3点,进行测量,取平均值。用 L 值表示菌盖的亮度;用BI值表示褐变程度,BI值计算公式^[22]如下:

$$BI = \frac{100 \times (x - 0.31)}{0.172}, \quad x = \frac{a + 1.75L}{5.645L + a - 3.012b}$$

式中:BI为蘑菇的褐变指数; L 为亮度; a 为红绿度; b 为蓝黄度。

1.2.9 数据处理与统计分析

结果表示为3次重复实验的平均值±标准偏差,用SPSS软件进行单因素方差分析,Duncan多重比较法进行差异显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同初始氧气含量处理对O₂,CO₂含量的影响

在贮藏过程中,处理组中O₂,CO₂的体积分数见图1,在双孢蘑菇的呼吸作用下,所有处理组的O₂体积分数迅速下降。O₂(10%)组、O₂(5%)组和O₂(21%)组中的O₂分别在第1天、第2天和第3天时就消耗完全,O₂(50%)组和O₂(75%)组则推迟到第7天和第10天。随着O₂的快速消耗,CO₂体积分数在整个贮藏期内不断上升。在贮藏后期,高氧组的CO₂体积分数达到37%,对照组和低氧组的CO₂体积分数分别为30%和25%左右。

参考文献[23]中的方法,计算贮藏第1天内不同处理组的呼吸速率值(见表1),不同初始O₂体积分数对双孢蘑菇的呼吸速率产生了显著影响,且呼吸速率的高低与氧气体积分数呈线性相关($R=0.9612$)。

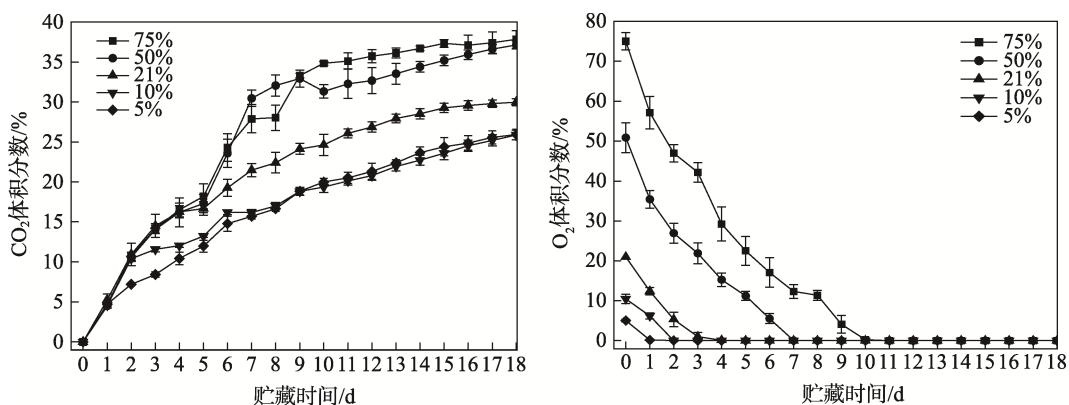


图1 不同初始浓度氧气处理对O₂,CO₂浓度的影响

Fig.1 Effect of treatment at different initial oxygen concentrations on O₂, CO₂ concentration

表 1 不同处理组贮藏第 1 天的呼吸速率值
Tab.1 Respiratory rate on 1d in different treatment groups

处理组	O ₂ (5%)组	O ₂ (10%)组	空气组	O ₂ (50%)组	O ₂ (75%)组
呼吸速率/(μg·kg ⁻¹ ·s ⁻¹)	6.04±0.12 ^{bc}	4.75±0.77 ^c	10.75±0.94 ^b	18.20±2.25 ^a	22.37±4.16 ^a

注：不同小写字母表示同 1 天内不同处理组之间差异显著（ $P<0.05$ ）

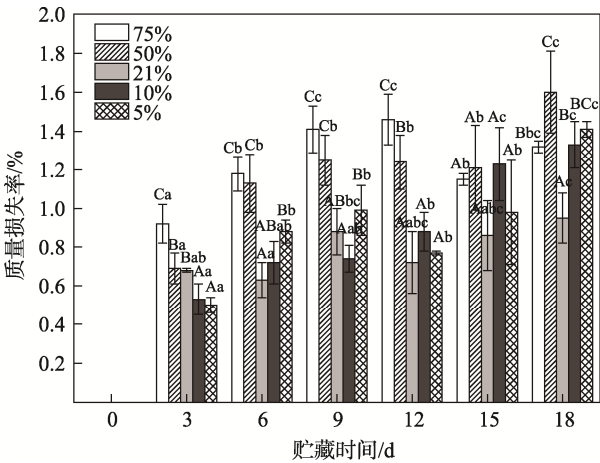
低氧处理组的呼吸速率显著低于空气和高氧组，反之，高氧处理组显著高于低氧组和空气组。此外，为了维持包装盒内的初始 O₂ 浓度，采用了高阻隔性的 PA/PE 膜，这导致包装内部 O₂ 的供给难以通过外部环境获取，以及包装盒内生成的高浓度 CO₂ 难以扩散到包装外。随着贮藏时间的延长，包装内部的气体成分会不断变化，这可能给维持蘑菇的品质产生不利影响。

2.2 不同初始氧气含量处理对质量损失率的影响

在贮藏期间，双孢蘑菇因呼吸和蒸腾作用导致失水，质量损失率增加，细胞膨压下降，萎蔫变软，所以质量损失率是衡量货架期品质的重要指标^[24]。双孢蘑菇在贮藏过程中的质量损失率变化见图 2，在整个贮藏期间，质量损失率呈缓慢上升的趋势。从整体来看，高氧组和低氧组的质量损失率均显著高于对照组（ $P<0.05$ ），可能是氧气体积分数的改变对蘑菇产生了胁迫，导致质量损失率增加。高氧和低氧气调均使贮藏期间的质量损失率增加，高氧效果更为明显。由于 PA/PE 薄膜具有高阻隔性，使得蘑菇在整个货架期间的质量损失率均低于 1.5%，此数值低于鲜切产品中质量损失率为 2.5% 的接受极限^[25]。

2.3 不同初始氧气含量处理对色泽的影响

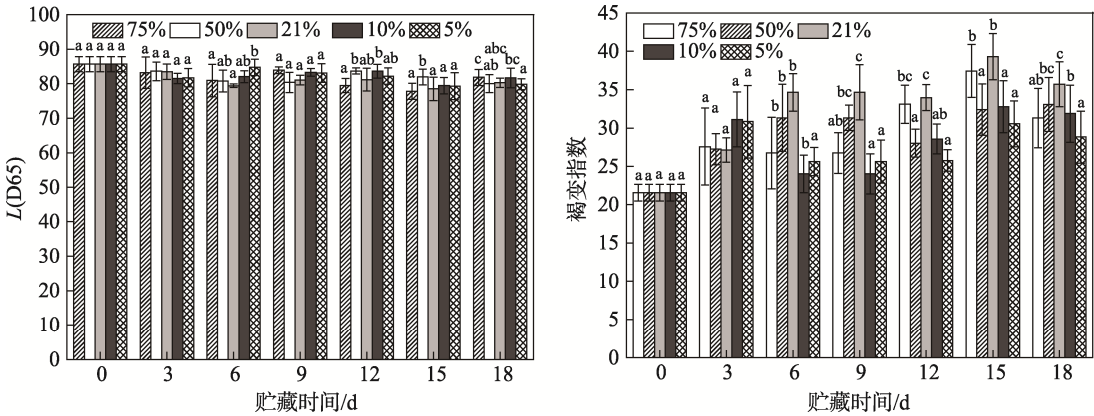
在贮藏过程中，双孢蘑菇的亮度 L 值、褐变指数 BI 值和内部褐变情况见图 3—4。在整个贮藏期间，各处理组双孢蘑菇的 L 值均有轻微下降，但都保持在



注：不同大写字母表示同一天内不同处理组之间差异显著，不同小写字母表示同一处理组不同时间之间差异显著（均表示 $P<0.05$ ）

图 2 不同初始氧气体积分数处理对双孢蘑菇质量损失率的影响
Fig.2 Effect of treatment at different initial oxygen concentrations on weight loss of agaricus bisporus

80 左右，表明高氧和低氧处理均能使蘑菇保持较好的亮度。 L 值高于 80，则意味着双孢蘑菇的外观品质在消费者可以接受的范围内^[26]，具有一定的商业价值和可食用性。O₂(50%)组贮藏 15d 和 O₂(75%)组贮藏 18d 的 L 值，较其他组有显著性差异，亮度维持得较好。从内部褐变情况来看，各处理组之间没有显著差异。值得注意的是，处理组蘑菇率先在菌柄处发生褐变，而菌盖内部等部位褐变不明显，这可能是由于采摘时的切割伤害给酶与底物的结合以及氧气的进入



注：不同小写字母表示同一天内不同处理组之间差异显著（ $P<0.05$ ）

图 3 不同初始氧气体积分数处理对双孢蘑菇 L 值和褐变度的影响
Fig.3 Effect of treatment at different initial oxygen concentrations on changes in L and BI of agaricus bisporus

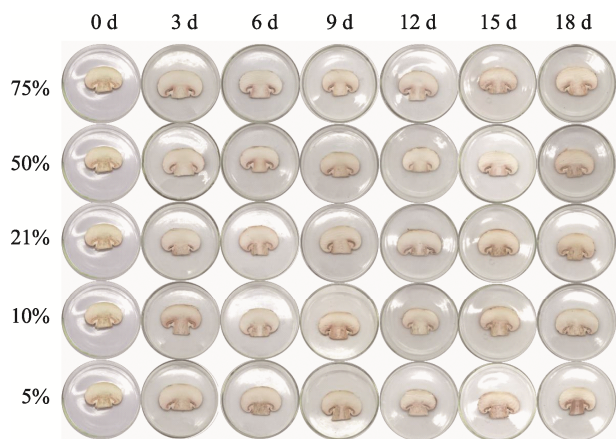


图4 不同初始氧气体积分数处理对双孢蘑菇内部褐变的影响

Fig.4 Effect of treatment at different initial oxygen concentrations on internal browning of *agaricus bisporus*

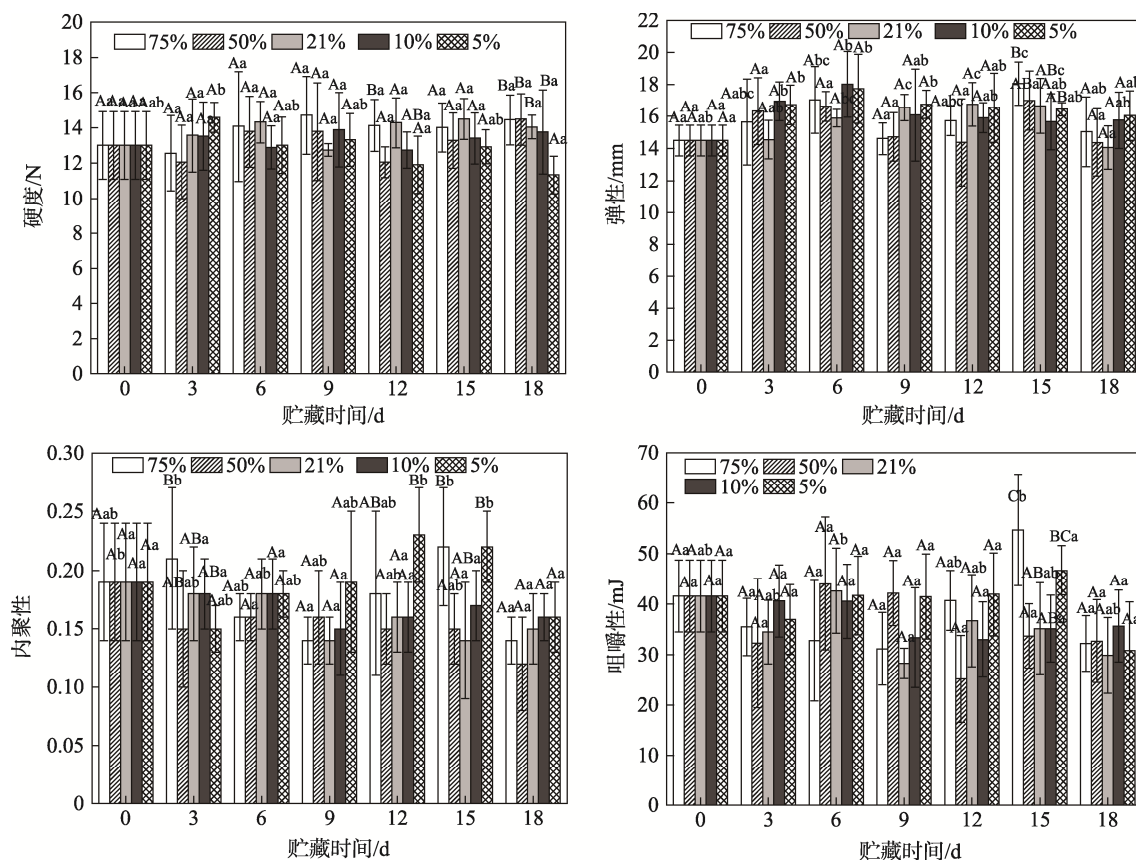
创造了有利条件。

研究发现,双孢蘑菇褐变分为生理褐变和病理褐变^[24],生理褐变主要是由多酚氧化酶与酚类底物接触反应发生酶促褐变,形成醌类物质,最后变成黑色素,呈褐色,使褐变度升高^[27],发生酶促褐变这一生理褐变。由图5可知,在贮藏过程中,所有处理组的褐变度都在增大,整体来看,高氧组和低氧组褐变度相比

对照组均维持在较低水平,能够更好地延缓蘑菇在贮藏期间的褐变,原因可能是包装中氧气体积分数的改变使得褐变相关酶的活性受到抑制,减缓了对双孢蘑菇表面组织的破坏,因此褐变程度较低。

2.4 不同初始氧气体积分数处理对质构特性的影响

贮藏期间双孢蘑菇硬度、弹性、内聚性和咀嚼性质构特性见图5。贮藏期间的质构变化主要与细胞壁化学成分的变化有关^[28],在贮藏期间,硬度保持较好,除贮藏第3天外,高氧组硬度值均高于低氧组,并且在贮藏18 d时, O₂(5%)组与其他处理组出现显著性差异 ($P<0.05$),说明高氧能够更好地维持蘑菇的硬度。此外,在贮藏期间硬度维持得较好,这可能与实验采用高阻隔性的 PA/PE 膜有关,一方面蘑菇经气调包装后有效减少了贮藏期间水分的流失,相关研究表明,质地的软化通常与水分流失有关,水分流失是造成新鲜蘑菇细胞壁膨压下降的主要原因,另外蘑菇自身接近于90%(质量分数)的高水分含量也利于其硬度的维持^[21,29];另一方面在贮藏期间,包装内部的CO₂含量一直处于较高水平,据研究报道,CO₂较高能够很好地保持蘑菇的硬度。这也是该实验需要进一步加以讨论验证的地方。



注:不同大写字母表示同一天内不同处理组之间差异显著,不同小写字母表示同一处理组不同时间之间差异显著(均表示 $P<0.05$)

图5 不同初始氧气体积分数处理对双孢蘑菇质构特性的影响

Fig.5 Effect of treatment at different initial oxygen concentrations on texture of *agaricus bisporus*

在贮藏过程中,蘑菇的弹性保持得较好,各处理组之间没有显著性差异;内聚性和咀嚼性呈现缓慢下降的趋势,当贮藏 3 d 时,除 $O_2(75\%)$ 组外,其他处理组的内聚性下降迅速,原因可能是在贮藏 3 d 期间,双孢蘑菇呼吸强度高,内部的糖类等物质被迅速分解,使蘑菇的内聚性降低; $O_2(75\%)$ 组在贮藏第 3 天时内聚性升高,这可能是由于高氧条件使细胞之间维持了较好的结合力。各处理组在氧气消耗完全之后,会进行无氧呼吸,内聚性和咀嚼性均维持在相对平衡的状态。

2.5 不同初始氧气体积分数处理对味觉值的影响

在贮藏过程中,双孢蘑菇的酸、甜、苦、咸、鲜等味觉值见图 6。在整个贮藏过程中,咸味和苦味变化不明显;甜味均增强,这与贮藏过程中 5'-腺苷酸的升高有关;酸味在贮藏过程中变化明显,呈现出不断下降的趋势,仍在消费者可接受范围内。电子舌所确定的感觉评分与人类感觉评估之间存在显著相关性,电子舌可以可靠地表征蘑菇的鲜味^[30]。在贮藏过程中,蘑菇的鲜味呈下降趋势,对照组和低氧组下降得更为明显,原因可能为 O_2 消耗较快,更早地进行无氧呼吸,造成糖类和蛋白质等营养物质的消耗,鲜味下降;高氧组在贮藏第 6 天时鲜味呈上升的趋势, $O_2(50\%)$ 组效果更明显,之后开始下降,在贮藏 18 d 时, $O_2(50\%)$ 组和 $O_2(75\%)$ 组鲜味强度分别下降

44.12%和 48.24%, 因为高氧组在贮藏前期发生有氧呼吸,可增强风味相关物质的产生,使鲜味上升,后期进行无氧呼吸,糖类和蛋白质等有机物消耗,导致鲜味下降。这一实验结果与核苷酸总量以及风味核苷酸反映的鲜味效果变化趋势一致,整体来看 50% (体积分数) 高氧处理更利于贮藏期间蘑菇鲜味的维持。

2.6 不同初始氧气体积分数处理对呈味核苷酸的影响

在贮藏期间,不同处理组蘑菇的核苷酸的变化规律见表 2。非挥发性化合物 5'-核苷酸是一种典型的鲜味物质,它不能单独激活味觉传感器,只能与味精协同作用,增加蘑菇的鲜味^[31-32]。以 5'-肌苷酸为标准,4 种核苷酸的相对鲜味强度为 5'-鸟苷酸 (2.3) > 5'-肌苷酸 (1.0) > 5'-黄苷酸 (0.53) > 5'-腺苷酸 (0.13) ^[33]。由于 5'-腺苷酸对鲜味的贡献值相对较低,所以风味核苷酸值通常表示为其它 3 种核苷酸值的总和^[23],风味核苷酸与味精类似成分 MSG-like 的协同作用可能会大大增加蘑菇的鲜味^[34]。

由表 2 可知,5'-腺苷酸含量最高,其可以增强甜味,掩盖苦味和涩味,与 5'-肌苷酸共同作用能够增强鲜味^[35]。5'-腺苷酸含量占 5'-核苷酸含量的一半以上,因此,5'-核苷酸的变化主要与 5'-腺苷酸的变化有关,5'-腺苷酸是 ATP 合成分解的中间产物。有相关研究表明,鲜味与能量化合物 (ATP, AMP) 密切

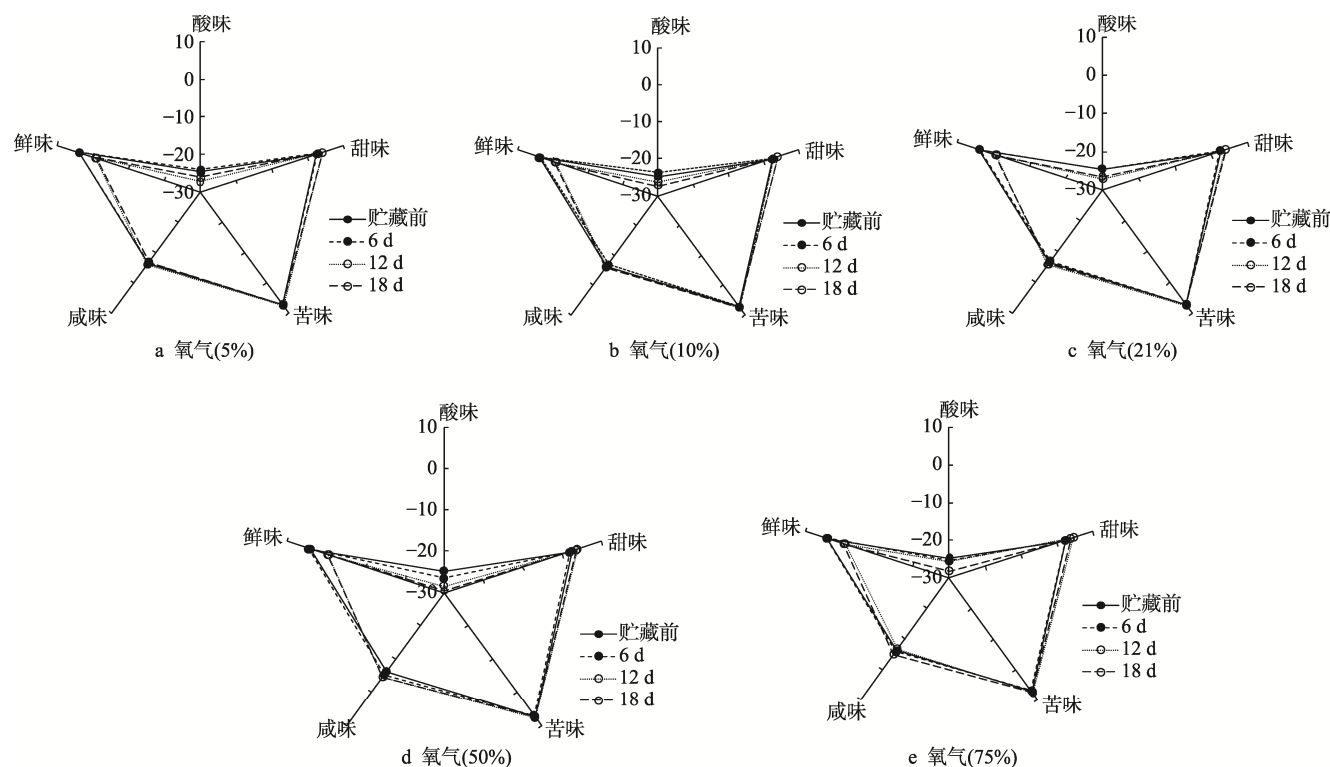


图 6 不同初始氧气体积分数处理对双孢蘑菇 5 种味道的影响

Fig.6 Effect of treatment at different initial oxygen concentrations on 5 tastes of *agaricus bisporus*

表 2 核苷酸的鲜质量
Tab.2 Fresh weight of Nucleotides

mg/g

核苷酸种类	初始氧气体积分数/%	贮藏前	贮藏 6 d	贮藏 12 d	贮藏 15 d
5'-肌苷酸	75	0.07085±0.00615 ^{Ab}	0.027±0.0105 ^{Aa}	0.0785±0.0065 ^{Ab}	0.0865±0.0233 ^{Bb}
	50	0.07085±0.00615 ^{Aa}	0.049±0.0183 ^{BCa}	0.09575±0.02445 ^{ABb}	0.0513±0.0019 ^{Aa}
	21	0.07085±0.00615 ^{Ab}	0.02315±0.00245 ^{Aa}	0.0775±0.0238 ^{Ab}	0.04515±0.00035 ^{Aa}
	10	0.07085±0.00615 ^{Ab}	0.0323±0.0034 ^{ABa}	0.1214±0.0111 ^{Bc}	0.03775±0.0155 ^{Aa}
	5	0.07085±0.00615 ^{Ab}	0.05855±0.00485 ^{Cab}	0.1157±0.0232 ^{Bc}	0.04195±0.01175 ^{Aa}
5'-鸟苷酸	75	0.1536±0.01285 ^{Aa}	0.1426±0.00245 ^{ABa}	0.1489±0.01355 ^{Aa}	0.1566±0.0055 ^{Ba}
	50	0.1536±0.01285 ^{Aa}	0.1508±0.0327 ^{ABa}	0.1373±0.0134 ^{Aa}	0.1942±0.00015 ^{Db}
	21	0.1536±0.01285 ^{Ac}	0.1007±0.00355 ^{Aa}	0.1271±0.00605 ^{Ab}	0.1505±0.0009 ^{Bbc}
	10	0.1536±0.01285 ^{Aa}	0.13±0.03385 ^{Ba}	0.1362±0.0238 ^{Aa}	0.13935±0.00645 ^{Aa}
	5	0.1536±0.01285 ^{Ab}	0.10295±0.00535 ^{Aa}	0.1844±0.02725 ^{Bc}	0.1707±0.00325 ^{Cbc}
5'-黄苷酸	75	0.1406±0.01745 ^{Abc}	0.1659±0.02825 ^{Bc}	0.1019±0.02015 ^{Bb}	0.05455±0.02485 ^{Aa}
	50	0.1406±0.01745 ^{Ab}	0.1504±0.01805 ^{Bb}	0.1442±0.0052 ^{Cb}	0.08185±0.02065 ^{ABa}
	21	0.1406±0.01745 ^{Ab}	0.1065±0.02015 ^{Aa}	0.09525±0.01765 ^{ABa}	0.1079±0.0023 ^{Ba}
	10	0.1406±0.01745 ^{Ab}	0.1351±0.00105 ^{ABb}	0.2111±0.0216 ^{Dc}	0.09125±0.00525 ^{ABa}
	5	0.1406±0.01745 ^{Ac}	0.1169±0.001 ^{Abc}	0.06935±0.01545 ^{Aa}	0.08175±0.04225 ^{ABab}
5'-腺苷酸	75	0.3702±0.00155 ^{Ac}	0.3295±0.00165 ^{ABc}	0.1687±0.06665 ^{Aa}	0.2461±0.03355 ^{Bb}
	50	0.3702±0.00155 ^{Ab}	0.4119±0.0592 ^{Bb}	0.2257±0.01575 ^{ABa}	0.2828±0.03915 ^{Ba}
	21	0.3702±0.00155 ^{Ac}	0.2987±0.0773 ^{Abc}	0.259±0.0001 ^{BCa}	0.1278±0.00425 ^{Ab}
	10	0.3702±0.00155 ^{Aa}	0.333±0.0826 ^{ABa}	0.2899±0.05845	0.3462±0.04455 ^{Ca}
	5	0.3702±0.00155 ^{Ac}	0.4168±0.0207 ^{Bd}	0.3143±0.0064 ^{Cb}	0.2563±0.0359 ^{Ba}
风味核苷酸	75	0.3649±0.01075 ^{Aa}	0.3354±0.0202 ^{Abc}	0.3294±0.0272 ^{Ba}	0.2977±0.05365 ^{Aa}
	50	0.3649±0.01075 ^{Aa}	0.3502±0.03295 ^{Abc}	0.3773±0.04305 ^{Ba}	0.3273±0.0227 ^{Aa}
	21	0.3649±0.01075 ^{Aa}	0.2393±0.02125 ^{Ba}	0.3104±0.0475 ^{Ba}	0.3036±0.00285 ^{Aa}
	10	0.3649±0.01075 ^{Aa}	0.2974±0.0875 ^{Ac}	0.4687±0.0565 ^{Ab}	0.2684±0.03355 ^{Aa}
	5	0.3649±0.01075 ^{Aa}	0.2784±0.0112 ^{ABab}	0.3694±0.0659 ^{Ba}	0.2944±0.05725 ^{Aa}
5'-核苷酸	75	0.7351±0.0092 ^{Ac}	0.6649±0.0185 ^{Bbc}	0.4981±0.09385 ^{Aa}	0.5437±0.0872 ^{ABab}
	50	0.7351±0.0092 ^{Ab}	0.7621±0.02625 ^{Cb}	0.6029±0.0273 ^{ABa}	0.6101±0.06185 ^{Ba}
	21	0.7351±0.0092 ^{Ac}	0.5289±0.05605 ^{Ab}	0.5694±0.0474 ^{Ab}	0.4313±0.0014 ^{Aa}
	10	0.7351±0.0092 ^{Abc}	0.6304±0.0049 ^{BCb}	0.7587±0.00195 ^{Cc}	0.6145±0.011 ^{Ba}
	5	0.7351±0.0092 ^{Ab}	0.6952±0.0319 ^{Bb}	0.6837±0.0723 ^{BCb}	0.5507±0.09315 ^{ABa}

注：风味核苷酸=5'-鸟苷酸+5'-肌苷酸+5'-黄苷酸；5'-核苷酸=5'-鸟苷酸+5'-肌苷酸+5'-黄苷酸+5'-腺苷酸；不同大写字母表示同一天内不同处理组之间差异显著，不同小写字母表示同一处理组不同时间之间差异显著（均表示 $P<0.05$ ）

相关^[21]，更高的能量状态可能有助于提高贮藏期间蘑菇的鲜味^[21]；同时与呼吸相关的细胞能量水平，还与采后果实的成熟、衰老、褐变和采后冷损伤等生理学

特性密切相关^[21,36—38]。高氧和低氧都与 ATP 相关，除 O₂(75%)组的第 12 天外，高氧和低氧组在贮藏期间的核苷酸总量均高于对照组，说明高氧和低氧处理

条件均在一定程度上减少了贮藏期间核苷酸的损失。

在所有核苷酸中, 5'-鸟苷酸对鲜味的影响最大, 5'-鸟苷酸可赋予蘑菇肉类风味, 增鲜效果比味精成分MSG更强^[34], 5'-鸟苷酸在贮藏期间每组的含量略有增加, 在贮藏18 d时, O₂(50%)组含量达到最大值(0.1942 mg/g)。在整个贮藏期间, O₂(50%)组的风味核苷酸含量始终高于其他所有组, 表明体积分数为50%的高氧处理可以保持风味核苷酸水平, 与其他处理组无显著性差异, 风味核苷酸的含量在整个贮藏期间保持相对平衡, 范围为0.2393~0.3773 mg/g(鲜质量)。核苷酸含量分为3类, 即低等(<1 mg/g, 干质量)、中等(1~5 mg/g)、高等(>5 mg/g)^[39]。文中核苷酸含量换算成干质量为1.807~2.849 mg/g, 因此文中研究的风味核苷酸含量为中等范围。低氧处理组和对照组分别在贮藏第1天、第2天、第3天时氧气消耗完全, 开始进行无氧呼吸, 导致营养损失, 风味核苷酸和核苷酸总量下降得较快。这种现象表明, 高氧处理可以更好地维持鲜味核苷酸的水平。体积分数为75%的高氧处理可能由于更长时间暴露于高氧条件下, 会产生高氧应激作用, 与核苷酸合成相关的酶活性受到抑制, 这解释了O₂(50%)组维持核苷酸水平的效果优于O₂(75%)组。

3 结语

在贮藏期间, 双孢蘑菇的品质变化与气调包装内部的初始氧气体积分数密切相关。研究结果表明, 高氧气调更有利于维持双孢蘑菇的硬度; 高氧和低氧处理均能减少贮藏期间核苷酸的损失, 其中体积分数为50%的高氧处理更利于维持风味核苷酸以及鲜味水平, 但是与其他处理组差异不显著; 高氧和低氧处理均能对酶促褐变的多酚氧化酶产生抑制作用, 使蘑菇保持较好的亮度值, 并延缓贮藏期间蘑菇的褐变, 其中低氧处理对褐变的延缓效果更好。

参考文献:

- [1] 王相友, 张惠, 李玲, 等. 高氧气调后续效应对双孢蘑菇货架品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 309—316.
WANG Xiang-you, ZHANG Hui, LI Ling, et al. Effects of the Follow-up Effect of High Oxygen Adjustment on Shelf Quality of *Agaricus Bisporus*[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 309—316.
- [2] MOHAPATRA D, BIRA Z M, KERRY J P, et al. Post-harvest Hardness and Color Evolution of White Button Mushrooms (*Agaricus Bisporus*)[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(3): E146—E152.
- [3] BELAY Z A, CALEB O J, OPARA U L. Influence of Initial Gas Modification on Physicochemical Quality Attributes and Molecular Changes in Fresh and Fresh-cut Fruit during Modified Atmosphere Packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 21: 100359.
- [4] 曹冬洁, 王相友, 王娟. 低温气调贮藏下CO₂含量对双孢蘑菇品质的影响[J]. 农产品加工, 2016(4): 9—13.
CAO Dong-jie, WANG Xiang-you, WANG Juan. Effect of CO₂ Content on the Quality of *Agaricus Bisporus* under Low-temperature Modified Atmosphere Storage[J]. Processing of Agricultural Products, 2016(4): 9—13.
- [5] MURR D P, MORRIS L L, 钟仲贤. 气体对蘑菇贮藏的影响[J]. 食用菌, 1980(4): 46—48.
P-MURR D, L-MORRIS L, ZHONG Zhong-xian. Effects of Gas on Mushroom Storage[J]. Edible Fungi, 1980(4): 46—48.
- [6] GHOLAMI R, AHMADI E, FARRIS S. Shelf Life Extension of White Mushrooms (*Agaricus rus*) by Low Temperatures Conditioning, Modified Atmosphere, and Nanocomposite Packaging Material[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2017, 14: 88—95.
- [7] 王娟, 王相友, 李霞. 低温气调贮藏下氧气含量对双孢蘑菇品质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 110—113.
WANG Juan, WANG Xiang-you, LI Xia. Effect of Oxygen Content on the Quality of *Agaricus Bisporus* under Low-temperature Modified Atmosphere[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 110—113.
- [8] LIU Z, WANG X, ZHU J, et al. Effect of High Oxygen Modified Atmosphere on Post-harvest Physiology and Sensorial Qualities of Mushroom[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(6): 1097—1103.
- [9] LI Y, ISHIKAWA Y, SATAKE T, et al. Effect of High-oxygen Packaging on Respiratory Physiology and Sensorial Qualities of Fresh Shiitake Mushrooms (*Lentinus Edodes*)[J]. Journal of Food Research, 2013, 2(6): 89—96.
- [10] LIU Z, WANG X. Changes in Color, Antioxidant, and Free Radical Scavenging Enzyme Activity of Mushrooms under High Oxygen Modified Atmospheres[J]. Postharvest Biology & Technology, 2012, 69: 1—6.
- [11] STEEN C V D, JACXSENS L, DEVLIEGHERE F, et al. Combining High Oxygen Atmospheres with Low Oxygen Modified Atmosphere Packaging to Improve

- the Keeping Quality of Strawberries and Raspberries[J]. 2002, 26(1): 49—58.
- [12] 李云云, 赵春霞, 程曦, 等. 高氧气调包装对双孢蘑菇微生物及其品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(2): 261—265.
- LI Yun-yun, ZHAO Chun-xia, CHENG Xi, et al. Effects of High Oxygen Modified Packaging on *Agaricus Bisporus* Microbes and Their Quality[J]. Food Science, 2016, 37(2): 261—265.
- [13] JAMJUMROON S, WONGSAREE C, MCGLASSON W B, et al. Alleviation of Cap Browning of 1-MCP/High CO₂-treated Straw Mushroom Buttons under MAP[J]. International Food Research Journal, 2013, 20(2): 581—585.
- [14] CHOI J W, JHUNE C S, Hong Y P, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene and Microperforated Film Packaging on Postharvest Quality of King Oyster Mushroom (*Pleurotus Eryngii*)[J]. Journal of Mushroom, 2012, 10(4): 191—197.
- [15] JAMJUMROON S, WONGSAREE C, MCGLASSON WB, et al. Alleviation of Cap Browning of 1-MCP/High CO₂-treated Straw Mushroom Buttons under MAP[J]. Parasite Immunology, 2013, 20(5): 241—247.
- [16] CHENG S, YU Y, GUO J, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene and Chitosan Treatment on the Storage Quality of Jujube Fruit and its Related Enzyme Activities[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 265: 109281.
- [17] 黄守程, 刘爱荣, 何华齐, 等. 1-MCP 处理对双孢蘑菇采后生理生化特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(8): 1959—1961.
- HUANG Shou-cheng, LIU Ai-rong, HE Hua-qi, et al. Effects of 1-MCP Treatment on Post-harvest Physiological and Biochemical Characteristics of *Agaricus Bisporus*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(8): 1959—1961.
- [18] HUAN C, AN X, YU M, et al. Effect of Combined Heat and 1-MCP Treatment on the Quality and Antioxidant Level of Peach Fruit during Storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 145: 193—202.
- [19] LI Y, ISHIKAWA Y, SATAKE T, et al. Effect of Active Modified Atmosphere Packaging with Different Initial Gas Compositions on Nutritional Compounds of Shiitake Mushrooms (*Lentinus Edodes*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 92: 107—113.
- [20] DONG W, ZHAO J, HU R, et al. Differentiation of Chinese Robusta Coffees According to Species, Using a Combined Electronic Nose and Tongue, with the Aid of Chemometrics[J]. Food Chemistry, 2017, 229: 743—751.
- [21] ZHANG Z, ZHANG X, XIN G, et al. Umami Taste and its association with Energy Status in Harvested *Pleurotus Geesteranus* Stored at Different Temperatures[J]. Food Chemistry, 2019, 279: 179—186.
- [22] PALOU E, LÓPEZ-MALO A, BARBOSA-CÁNOVAS GV, et al. Polyphenoloxidase Activity and Color of Blanched and High Hydrostatic Pressure Treated Banana Puree[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(1): 42—45.
- [23] SUN B, CHEN X, XIN G, et al. Effect of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) on Quality of Button Mushrooms (*Agaricus Bisporus*) Packaged in Different Packaging Materials[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159: 111023.
- [24] 卞生珍, 杨清香. 双孢菇采后的生理生化变化[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2007(2): 80—83.
- BIAN Sheng-zhen, YANG Qing-xiang. Physiological and Biochemical Changes of *Agaricus Bisporus*[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Science Edition), 2007(2): 80—83.
- [25] MAHAJAN P V, OLIVEIRA F, MONTANEZ J C, et al. Development of User-friendly Software for Design of Modified Atmosphere Packaging for Fresh and Fresh-cut Produce[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2007, 8(1): 84—92.
- [26] BRIONES G L, VAROQUAUX P, CHAMBROY Y, et al. Storage of Common Mushroom under Controlled Atmospheres[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2007, 27(5): 493—505.
- [27] 徐冬颖, 姜爱丽, 胡文忠, 等. 双孢菇保鲜及抗褐变处理研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(6): 254—259.
- XU Dong-ying, JIANG Ai-li, HU Wen-zhong, et al. Research Status on Fresh-keeping and Anti-browning Treatment of *Agaricus Bisporus*[J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(6): 254—259.
- [28] WANG L, JIN P, WANG J, et al. Effect of B-Aminobutyric Acid on Cell Wall Modification and Senescence in Sweet Cherry during Storage at 20 °C[J]. Food Chemistry, 2015, 175: 471—477.
- [29] JIANG T. Effect of Alginate Coating on Physicochemical and Sensory Qualities of Button Mushrooms (*Agaricus Bisporus*) under a High Oxygen Modified Atmosphere[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 76: 91—97.
- [30] DONGLU F, WENJIAN Y, KIMATU BM, et al. Comparison of Flavor Qualities of Mushrooms (*Flammulina Velutipes*) Packed with Different Packaging Materials[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 1—9.

- [31] ZHANG Y, VENKITASAMY C, PAN Z, et al. Recent Developments on Umami Ingredients of Edible Mushrooms-A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 33(2): 78—92.
- [32] BELUHAN S, RANOGAJEC A. Chemical Composition and Non-volatile Components of Croatian Wild Edible Mushrooms[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 1076—1082.
- [33] YAMAGUCHI S, YOSHIKAWA T, IKEDA S, et al. Measurement of the Relative Taste Intensity of Some L- α -amino Acids and 5'-Nucleotides[J]. Journal of Food Science, 1971, 36(6): 846—849.
- [34] TSAI SY, WENG CC, HUANG SJ, et al. Nonvolatile Taste Components of *Grifola Frondosa*, *Morchella Es-culenta* and *Termitomyces Albuminosus* Mycelia[J]. LWT-food Science and Technology, 2006, 39(10): 1066—1071.
- [35] 王晓燕, 潘晓炀, 焦阳, 等. 通电加热过程中凡纳滨对虾肉糜的游离氨基酸和核苷酸含量变化研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 71—75.
- WANG Xiao-yan, PAN Xiao-yang, JIAO Yang, et al. Study on Changes of Free Amino Acid and Nucleotide Contents in Shrimp Meat of *Litopenaeus Vannamei* during Electric Heating[J]. Food Industry Technology, 2019, 40(20): 71—75.
- [36] PAN Y G, YUAN M Q, ZHANG W M, et al. Effect of Low Temperatures on Chilling Injury in Relation to Energy Status in Papaya Fruit during Storage[J]. Post-harvest Biology and Technology, 2017, 125: 181—187.
- [37] 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.
- [38] HU Y H, CHEN C M, XU L, et al. Postharvest Application of 4-Methoxy Cinnamic Acid for Extending the Shelf Life of Mushroom (*Agaricus Bisporus*)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 104: 33—41.
- [39] MAU J L, LIN H C, MA J T, et al. Non-volatile Taste Components of Several Speciality Mushrooms[J]. Food Chemistry, 2001, 73(4): 461—466.