

低剂量⁶⁰Co γ射线辐照处理影响贮藏期鲜香菇保鲜效果

周冉冉^{1,2}, 高虹¹, 范秀芝¹, 殷朝敏¹, 陈浙娅¹, 姚芬¹, 史德芳^{1,3}

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064) (2. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430064) (3. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 此项目研究低剂量⁶⁰Coγ射线辐照处理对鲜香菇保鲜效果的影响。新鲜香菇分别使用0、1、1.5、2 kGy剂量进行辐照处理之后, 贮藏于4±1℃、湿度为80±5%的环境, 并对其微生物含量、组织硬度、色泽和相关的内源酶活性, 例如, 超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽还原酶(GR)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)、纤维素酶、几丁质酶品质指标进行测定。结果表明: 1 kGy的照射剂量显著延迟(4~8 d)果实体软化和褐变的发生。在贮藏过程中, 1 kGy照射剂量可以控制抗氧化系统中酶活性的降低, 减少纤维素和几丁质的积累, 并抑制蘑菇的衰老。因此, 1 kGy的⁶⁰Coγ射线辐照能较好的保持香菇的品质特性, 达到保鲜的效果。照射剂量在1.5 kGy以上会加快鲜香菇品质劣变。

关键词: γ射线; 辐照; 香菇; 品质裂变; 酶

文章编号: 1673-9078(2018)09-190-197

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.9.027

Preservative Effects of Low-dose ⁶⁰Coγ-ray Irradiation Treatment on the Freshness of Fresh *Lentinus edodes* in Storage

ZHOU Ran-ran^{1,2}, GAO Hong¹, FAN Xiu-zhi¹, YIN Chao-min¹, CHEN Zhe-ya¹, YAO Fen¹,
SHI De-fang^{1,3}

(1. Institute for Farm Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China) (2. Hubei University of Technology, Bioengineering and Food Institute, Wuhan 430064, China) (3. Huazhong Agricultural University School of Food Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: This study examined the freshness-preserving effect of low-dose ⁶⁰Co γ-ray irradiation treatment on the freshness of fresh mushrooms. Fresh *Lentinus edodes* were irradiated with 0, 1, 1.5 or 2 kGy dose, respectively, before being stored at 4±1℃ and humidity of 80±5%. Then, the microbial content, tissue firmness, color, and activities of enzymes (superoxide dismutase (SOD), glutathione reductase (GR), phenylalanine ammonia lyase (PAL), cellulase, and chitinase) were measured. Obtained results showed that the exposure to irradiation at a dose of 1 kGy significantly delayed (4~8 days) fruit softening and browning. During storage, the irradiation dose of 1 kGy can control the reduction of enzyme activity in the antioxidant systems, reduce the accumulation of cellulose and chitin, and inhibition the aging of the mushroom. Therefore, the ⁶⁰Co γ-ray irradiation dose of 1 kGy can help preserve the characteristic quality of fresh mushrooms, but an irradiation doses above 1.5 kGy could accelerate the quality deterioration of fresh mushrooms.

Key words: γ-ray; irradiation; *Lentinus edodes*; quality deterioration; enzyme

收稿日期: 2018-04-10

基金项目: 湖北省技术创新专项(重大项目)(2017ABA148); 山西省重点研发计划重点项目(201603D21106); 湖北省农业科学院竞争性科技计划项目(2016jzxjh016); 湖北省农业科技创新中心资助项目(2018-620-000-001-033)

作者简介: 周冉冉(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: (药)食用菌功能食品开发

通讯作者: 史德芳(1979-), 男, 博士研究生, 副研究员, 研究方向: (药)食用菌功能食品开发

香菇(*Lentinus edodes*), 属于真菌中的一种可食用菌, 是世界第二大食用菌^[1]。鲜香菇富含蛋白质、维生素、矿物质和一般蔬菜不含有的麦角甾醇, 其中蛋白质由18种氨基酸组成, 并含有8种人体必需的氨基酸^[2]。此外, 其含有的香菇多糖具有多种生物活性, 是目前已知的最强免疫增强剂之一^[3]。香菇还具有降血脂和抗肿瘤的作用^[4-6]。

随着消费者对天然健康理念的认同和追求, 目前, 其消费模式已经发生了转变, 逐渐由干香菇向鲜香菇

转变。鲜香菇含 90% 左右的水分, 其含水量极高, 不同与农产品的不同, 由于没有外皮保护, 容易在采摘和运输过程中容易受到机械损伤, 采后菇体的呼吸作用及蒸腾作用旺盛, 极易发生失水萎焉、皱缩、褐变和腐烂等品质劣变现象^[7], 因此, 如何保持鲜香菇的食用品质, 延长货架期是业界亟需解决的问题之一^[8]。针对鲜香菇的这种特性, 探究一种方便有效的保鲜方法十分必要。

目前鲜香菇的保鲜方法有低温贮藏^[9]、气调包装^[10], 涂膜保鲜^[11]和辐照^[12]等。食品辐照处理是一种非热型加工保鲜新技术, 具有抑制发芽、推迟成熟、杀虫、灭菌和延长货架期等作用, 广泛运用于果蔬的加工、贮藏保鲜^[13]。目前运用到的辐照包括钴-60、铯-137 产生的 γ 射线和电子加速器产生的低于 100 MeV 电子束射线。⁶⁰Co γ 射线辐照是一种物理保鲜方式, 和传统的热加工杀菌方式相比, 是一种冷杀菌方式^[14,15]。食用菌在采后仍然有较强的生命活动, 酶活是生命活动中最重要的活动, 也是影响果蔬类食品保鲜效果的关键因素之一^[16]。本文采用 ⁶⁰Co- γ 射线辐照处理鲜香菇, 通过不同辐照剂量处理后在 4 \pm 1 $^{\circ}$ C、湿度为 80 \pm 5% 的环境下进行贮藏试验, 通过考察 ⁶⁰Co γ 的灭菌效果和对香菇硬度、色泽、相关酶活性的影响, 确定出最佳辐照剂量, 为鲜香菇辐照保鲜提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 原料处理

新鲜香菇, 购于三友(随州)食品有限公司。挑选大小均一, 外观一致, 未开伞无机械损伤的新鲜香菇, 将其分为 4 组, 每组 6 袋, 每袋 10 个。4 组香菇分别做以下处理: (1) 不做任何处理, 作为对照组 (CK); (2) 1 kGy ⁶⁰Co γ 射线辐照; (3) 1.5 kGy ⁶⁰Co γ 射线辐照; (4) 2 kGy ⁶⁰Co γ 射线辐照。处理结束后放置 4 \pm 1 $^{\circ}$ C, 湿度 80 \pm 5% 的环境中贮藏, 分别在贮藏第 0、4、8、12、16、20 d 进行指标测定。

1.2 试剂与仪器

磷酸氢二钠, 磷酸二氢钠, 聚乙烯吡咯烷酮 K30 (PVP), 蛋氨酸 (MET), 核黄素, EDTA 二钠, EDTA, 硼酸, 硼砂, 平板计数培养基 (PCA), 马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (PDA), 国药集团化学试剂有限公司; 氮蓝四唑 (NBT), Sigma; 二硫苏糖醇 (DTT), L-苯丙氨酸, 上海麦克林生物化学有限公司; 氧化型谷胱甘肽 (GSSG), NADPH 四钠盐, Biofrox; β -巯基乙醇, 西亚试剂; 纤维素酶试剂盒, 几丁质酶试剂盒,

南京建成生物工程研究所。

TA-Txplus 质构仪, 英国 SMS 公司; UV-1800 紫外可见分光光度计, 岛津; H1650R 型医用离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; 伽马射线辐照源, ⁶⁰Co 源 (装源量 25.5 万居里), 湖北省辐照实验中心。

1.3 实验方法

1.3.1 微生物含量的测定

参照 Jiang T 等^[17]的方法稍作改动。用平板计数培养基 (PCA) 培养嗜温菌, 培养条件为 2 d, 温度为 35 \pm 1 $^{\circ}$ C; 用 PDA 培养霉菌、酵母, 培养条件为: 5~7 d, 温度为 28 \pm 1 $^{\circ}$ C。

1.3.2 硬度的测定

参照李志啸等^[18]的方法稍作改动。使用 TA-Txplus 质构仪对香菇进行硬度测定, 选用 P/36R 探头。将香菇放置在操作台上, 探头以 5 mm/s 的速度进行下压, 用最大力的峰值表示硬度。

1.3.3 色泽的测定

参照 Jiang T^[19]的方法稍作改动。用 CR-400 色彩色差计对香菇的色泽 (L*, a*, b*) 进行测定, 检测香菇盖纵切面正中点, 平行测定三次。L* 表示白色, L* 值越小表示越黑; a* 表示红绿, 值“+”为红, “-”为绿; b* 表示黄蓝, 值“+”为黄, “-”为蓝, 每个香菇理想的颜色值是 L₀=97, a₀=-2, b₀=0。 ΔE 值表示与理想颜色值相比, 香菇色泽变化的程度, 用测得的 L*, a*, b* 计算 ΔE 值和褐变指数 (BI), 公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}$$

$$BI = (100(x - 0.31))/0.172,$$

$$\text{其中 } x = \frac{a^* + 1.75 \times L^*}{5.645 \times L^* + a^* - 3.012 \times b^*}$$

1.3.4 超氧化物歧化酶活性测定

参照曹建康^[20]的方法进行测定, 取 1 g 样品, 加入 3 mL 提取缓冲液冰浴研磨, 离心取上清。向试管中加入反应液及酶液。2 支空白管加入提取缓冲液代替酶液。试管混匀后, 将其中一支空白管放置于暗处, 其余试管置于 4000 lx 日光灯下反映 15 min 后立即置于暗处终止反应, 并于 560 nm 处测定吸光值。不照光照空白管做空白调零, SOD 活性 (U/g 组织) 计算公式如下:

$$\text{SOD活性}(U/g \text{组织}) = \frac{(A_0 - A_s) \times V}{0.5 \times A_0 \times 0.1 \times 15 \times M}$$

其中: A₀-照光空白管测定吸光度值; A_s-样品管测定吸光度值; V-样品提取液总体积; M-样品的质量。

1.3.5 谷胱甘肽还原酶活性测定

参照曹建康等^[20]的方法进行测定,取1 g样品,加入5 mL提取缓冲液冰浴研磨,离心取上清液酶液。向试管中加入反应液和0.2 mL酶液。再加入40 μL 4 mmol/L NADPH溶液后立即混合计时,30 s后在340 nm处开始测定吸光度 A_1 ,每隔30 s测定一次,连续测定6次($A_1 \sim A_6$)。用蒸馏水进行空白调零,GR活性(U/g组织)计算公式如下:

$$GR\text{活性}(U/g\text{组织}) = \frac{(A_1 - A_6) \times V}{0.01 \times 0.2 \times 2.5 \times M}$$

其中: A_1 -反应混合液吸光度初始值; A_6 -反应混合液吸光度终止值;V-样品提取液总体积;M-样品的质量。

1.3.6 苯丙氨酸解氨酶活性测定

参照曹建康等^[20]的方法进行测定,取1 g样品,加入5 mL提取缓冲液冰浴研磨,离心取上清液酶液低温保存。向试管中加入3反应液,放入37℃保温10 min后加入0.5 mL酶液迅速混合并测定混合液在290 nm下的吸光值 A_0 。将试管再放入37℃保温60 min后,立即测定此时吸光值 A_1 。蒸馏水作为空白调零,PAL活性(U/g组织)计算公式如下:

$$PAL\text{活性}(U/g\text{组织}) = \frac{(A_1 - A_0) \times V}{0.01 \times 0.5 \times M}$$

其中:V-样品提取液总体积;M-样品的质量。

1.3.7 纤维素酶活性测定

采用南京建成生物工程研究所生产的相应试剂盒测定。按照纤维素酶试剂盒说明书进行操作,于550 nm下测定样品吸光度值。CL活性(U/g组织)计算公式如下:

$$CL\text{活性}(U/g\text{组织}) = \frac{(A_1 - A_c) \times 2000 \times 0.35 \times 3.6}{(A_s - A_0) \times 0.05 \times 30 \times M}$$

其中: A_1 -样品管测定吸光度值; A_c -对照管测定吸光度值; A_s -标准管测定吸光度值; A_0 -空白管测定吸光度值;V-样品提取液总体积;M-样品的质量。

1.3.8 几丁质酶活性测定

采用南京建成生物工程研究所生产的相应试剂盒测定。取1 g样品加入3 mL提取缓冲液在冰浴研磨均浆后,离心,取上清酶液待测。

按照几丁质酶试剂盒说明书进行操作,于585 nm下测定样品吸光度值。几丁质酶活性(U/g组织)计算公式如下:

$$\text{几丁质酶活性}(U/g\text{组织}) = \frac{1.803 \times (A + 0.0143)}{M}$$

其中:A-样品测定吸光度值;M-样品的质量。

1.4 数据处理

每组样品平行测定三次,数据用 $\bar{x} \pm s$ 来表示。采用SPSS 22.0软件对所有实验数据进行ANONA显著性分析,其中 $p < 0.05$ 代表差异显著,所有图表采用Origin 8.0进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同辐照处理对微生物的影响

不同辐照处理的香菇中含有嗜温菌、霉菌和酵母菌的数量的检测结果如表1和表2所示,经过不同剂量辐照之后,香菇所含有的嗜温菌、霉菌和酵母菌数量显著减小,而且在贮藏期间,辐照组的嗜温菌、霉菌和酵母菌数量显著低于对照组($p < 0.05$),由此可见,辐照能显著抑制微生物的生长。这与Jiang T^[17]研究结论是一致的,即辐照能抑制微生物生长,但辐照剂量不同,抑菌效果也不同。

表1 不同辐照处理对嗜温菌数量的影响

Table 1 Effect of different irradiation treatments on mesophilic bacteria

贮藏时间/d	辐照剂量/KGy			
	0	1	1.5	2
0	2.05±0.10 ^a	1.21±0.17 ^b	1.42±0.10 ^b	1.22±0.17 ^b
4	3.58±0.07 ^a	2.42±0.32 ^b	2.12±0.17 ^b	2.22±0.17 ^b
8	3.86±0.05 ^a	2.60±0.11 ^b	2.30±0.24 ^c	2.22±0.17 ^c
12	3.89±0.11 ^a	2.73±0.12 ^b	2.67±0.16 ^b	2.43±0.32 ^b
16	3.76±0.11 ^a	2.82±0.11 ^b	2.70±0.22 ^{cb}	2.43±0.23 ^c
20	4.41±0.06 ^a	3.89±0.13 ^b	3.83±0.12 ^b	2.52±0.07 ^c

注:同行字母不同代表差异性显著($p < 0.05$)。

表2 不同辐照处理对霉菌和酵母菌数量的影响

Table 2 Effects of different irradiation treatments on the number of Fungi and Yeast

贮藏时间/d	辐照剂量/KGy			
	0	1	1.5	2
0	3.17±0.16 ^a	2.00±0.17 ^b	1.65±0.11 ^c	1.87±0.15 ^c
4	3.39±0.09 ^a	2.70±0.11 ^b	2.30±0.17 ^c	2.40±0.24 ^c
8	4.00±0.09 ^a	3.15±0.06 ^b	2.60±0.20 ^c	2.40±0.10 ^c
12	4.72±0.03 ^a	2.60±0.15 ^b	2.87±0.24 ^b	2.00±0.04 ^c
16	4.86±0.04 ^a	3.37±0.06 ^b	3.16±0.15 ^c	3.15±0.10 ^c
20	4.95±0.06 ^a	3.54±0.06 ^b	3.23±0.08 ^b	3.20±0.04 ^b

注:同行字母不同代表差异性显著($p < 0.05$)。

2.2 不同辐照处理对香菇硬度的影响

消费者判断香菇品质的重要指标之一是香菇的硬度^[17],香菇硬度下降是其品质劣变的原因之一。

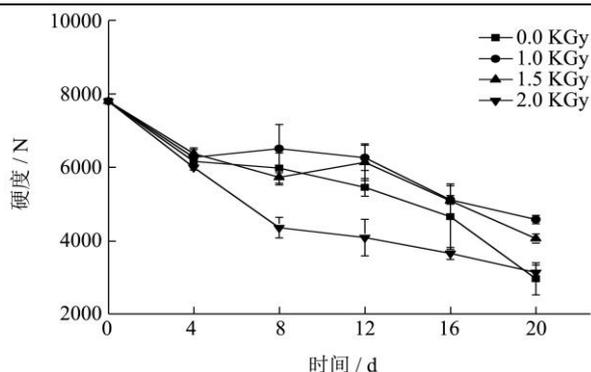


图 1 不同辐照剂量对香菇硬度的影响

Fig.1 Effect of different irradiation treatments on the hardness of *Lentinus edodes*

如图 1 所示, 随着贮藏时间的延长, 香菇硬度呈

下降趋势。香菇硬度的下降, 可能是采后由于细菌对细胞壁的降解以及内源性自溶素的活性增加导致的^[21], 在第 4 d, 香菇硬度差异并不显著 ($p>0.05$), 不同辐照剂量组硬度下降趋势大致相同; 到贮藏第 20 d, 4 组不同处理的硬度下降率分别是 62.18%、41.42%、48.07%和 59.97%, 0 KGy 组和 2 KGy 组下降较 1 KGy 组和 1.5 KGy 组快。1 KGy 组的硬度较其他组硬度大, 其显著性 $p<0.05$, 因此, 1 KGy 辐照处理的香菇硬度较其他组好。Jiang T^[17]等人通过实验得到 1.0 KGy 和 1.5 KGy 结合气调包装可以保持高水平的香菇质地达到 20 d 左右。

2.3 不同辐照处理对香菇色泽的影响

表 3 不同辐照处理对香菇色泽的影响

Table 3 Effect of different irradiation treatments on the color of *Lentinus edodes*

贮藏时间/d	辐照剂量/KGy			
	0	1	1.5	2
0	7.82±0.28 ^a	7.93±0.04 ^a	7.75±0.18 ^a	8.31±0.59 ^a
4	9.34±0.39 ^a	9.71±0.05 ^a	8.99±0.25 ^a	11.01±0.81 ^a
8	12.61±0.46 ^a	11.82±0.29 ^a	12.58±0.43 ^a	11.08±0.83 ^a
12	12.86±0.33 ^a	11.17±0.83 ^a	11.56±0.43 ^a	11.98±0.59 ^a
16	12.25±0.49 ^a	10.10±0.68 ^b	12.98±0.58 ^a	10.05±0.85 ^b
20	12.69±0.26 ^a	11.12±0.42 ^b	12.58±0.43 ^{ab}	12.19±0.55 ^{ab}

注: 同行字母不同代表差异性显著 ($p<0.05$)。

表 4 不同辐照处理对香菇褐变指数的影响

Table 4 Effect of different irradiation treatments on browning index of *Lentinus edodes*

贮藏时间/d	辐照剂量/KGy			
	0	1	1.5	2
0	0.89±0.05 ^a	0.74±0.04 ^b	0.96±0.04 ^a	0.72±0.14 ^b
4	1.07±0.07 ^a	1.13±0.11 ^a	1.14±0.62 ^a	1.43±0.12 ^a
8	1.76±0.27 ^a	1.77±0.20 ^a	1.94±0.52 ^a	1.42±0.34 ^a
12	1.59±0.17 ^a	1.37±0.46 ^a	1.20±0.02 ^a	1.61±0.17 ^a
16	2.03±0.22 ^a	1.32±0.13 ^b	1.88±0.28 ^a	1.39±0.37 ^b
20	2.37±0.88 ^{ab}	1.21±0.12 ^b	1.65±0.28 ^a	1.44±0.11 ^{ab}

注: 同行字母不同代表差异性显著 ($p<0.05$)。

香菇在采摘之后, 生物体仍在进行活跃的代谢活动, 由于贮藏时间的延长, 生物体产生的氧化产物积累导致褐变, 组织褐变是评价食用菌品质的重要指标之一^[22]。香菇组织褐变也有可能归因于微生物的作用^[23]。

由表 3 和表 4 可知: 到贮藏 12 d, 香菇色泽差异并不显著 ($p>0.05$), 说明辐照处理对香菇色泽没有直接的影响。从贮藏第 16 d 开始, 0 KGy 组和 1 KGy 组香菇变化较 1.5 KGy 组和 2 KGy 组差异显著

($p<0.05$), 到贮藏结束, 1 KGy 组的 ΔE 值为 11.12±0.42, 较其他组的 ΔE 值小, 表明与理想颜色值相比, 香菇色泽变化的程度较小; 1 KGy 组的褐变指数为 1.21±0.12, 相比于其他组的褐变指数都小, 说明 1 KGy 组的褐变程度较其他组小。

2.4 不同辐照处理对香菇 SOD 活性和 GR 活性的影响

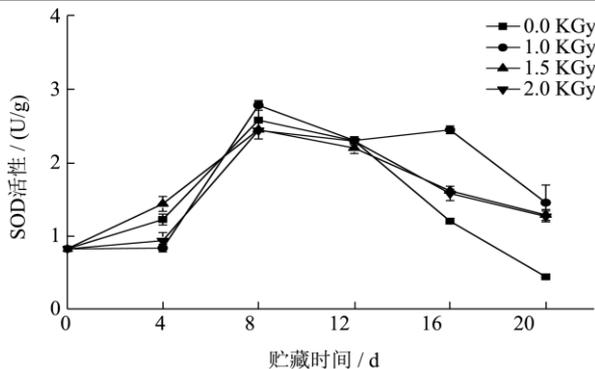


图2 不同辐照处理对香菇 SOD 活性的影响

Fig.2 Effect of different irradiation treatments on SOD activity of *Lentinus edodes*

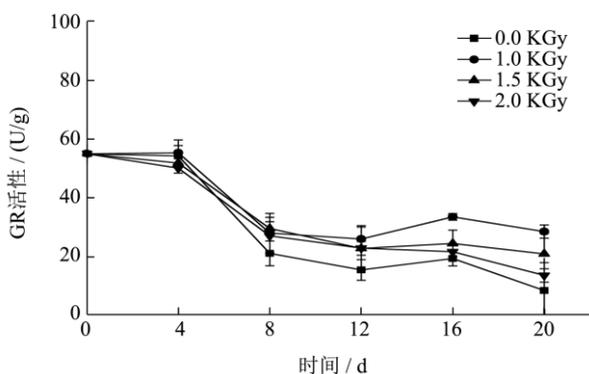


图3 不同辐照处理对香菇 GR 活性的影响

Fig.3 Effect of different irradiation treatments on GR activity of *Lentinus edodes*

超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽还原酶(GR)是属于植物抗氧化系统中的酶的,抗氧化系统在植物的成熟和衰老的过程起着重要作用^[11]。

由图2可知:辐照之后的SOD活性呈先升高后降低的趋势,到贮藏第4d,香菇的SOD活性差异显著($p < 0.05$),这可能与辐照诱发自由基的产生有关^[24]。到贮藏第12d,1 KGy组SOD活性较其他组下降缓慢。由图3可知:GR活性是呈下降趋势的,1 KGy组GR活性降低率为49.09%,而0 KGy、1.5 KGy和2.0 KGy组的分别是84.51%、63.63%和76.36%,由此可知1 KGy组GR活性较其他组下降缓慢,说明剂量为1 KGy能延缓其抗氧化能力的降低。

2.5 不同辐照处理对香菇 PAL 活性的影响

PAL是许多植物酚类物质和木质素等次生物质生物合成途径的关键酶,木质素是植物细胞壁次生结构的主要成分,木质素含量在贮藏过程中积累会引起植物组织质地老化,影响食品的食用口感^[25,26]。受到辐照后香菇组织的防卫系统特别是苯丙烷代谢被激活,PAL活性迅速上升,提高了组织的抗逆境能力。

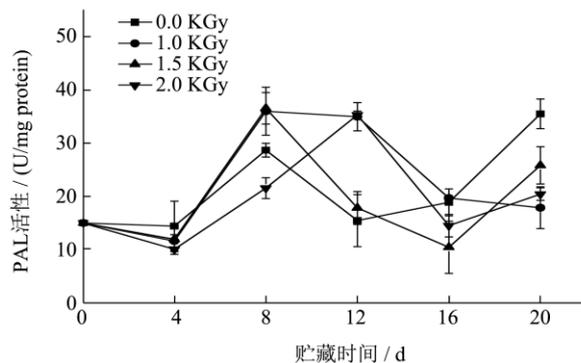


图4 不同辐照处理对香菇 PAL 活性的影响

Fig.4 Effect of different irradiation treatments on PAL activity of *Lentinus edodes*

由图可知:PAL活性整体是呈上升趋势的,说明在贮藏过程中木质素的含量是逐渐增加的。辐照第0d,1 KGy组与1.5 KGy相比差异并不显著($p > 0.05$),在之后的贮藏期间,对照组与辐照组差异显著($p < 0.05$),说明辐照对PAL活性有影响,由图可知,贮藏8d后,1 KGy组明显呈下降趋势,说明木质素的积累是在逐渐降低的;到贮藏结束0 KGy、1.0 KGy、1.5 KGy和2.0 KGy组的PAL活性整体上升率分别为57.14%、13.33%、40.01%和25.51%,1 KGy组相比于其他组的PAL活性上升较低,组织质地老化较轻,因此,1 KGy辐照能较好的抑制其组织质地的老化。

2.6 不同辐照处理对香菇纤维素酶活性的影响

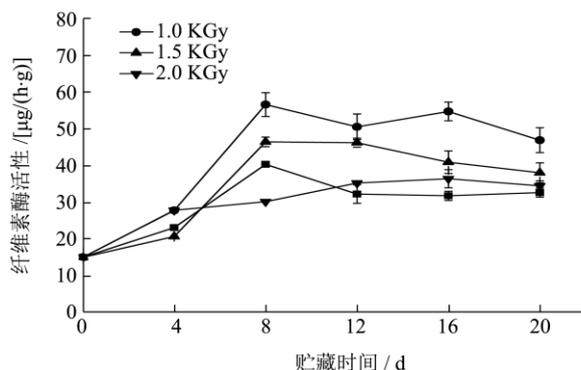


图5 不同辐照处理对香菇纤维束酶活性的影响

Fig.5 Effect of different irradiation treatments on fiber bundle enzyme activity of *Lentinus edodes*

纤维素是植物细胞壁的主要成分之一,在植物细胞壁中起着重要作用:是衡量细胞老化的指标之一^[27,28]。纤维素能在纤维素酶的作用下被水解,有实验结果表明,香菇贮藏过程中纤维束含量是增加的,香菇中纤维素含量高可能会影响其质地老化^[11]。

由图可知：香菇中纤维素酶活性呈上升趋势，辐照组与对照组差异显著 ($p < 0.05$)，0 KGy、1.0 KGy、1.5 KGy 和 2.0 KGy 组的纤维素酶活性分别增加了 53.12%、67.39%、60.52% 和 55.88%，1 KGy 组活性较其他辐照组强，说明剂量为 1 KGy 能减少纤维素的积累，较好的保持香菇的质地，延迟香菇组织老化。

2.7 不同辐照处理对香菇几丁质酶活性的影响

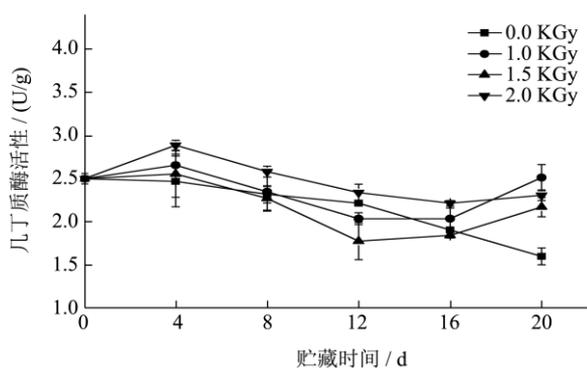


图 6 不同辐照处理对香菇几丁质酶活性的影响

Fig.6 Effect of different irradiation treatments on chitinase activity of *Lentinus edodes*

几丁质酶能降解几丁质，几丁质是多种真菌细胞壁的主要成分，因此，植物中广泛存在几丁质酶能抑制病原菌的生长^[20]；同时香菇细胞壁中几丁质含量增多与香菇的韧性呈正相关^[21]。由实验可知，香菇在贮藏期间几丁质的含量是逐渐上升的^[11]。由图可知：在贮藏期间几丁质酶活性是呈下降趋势的，到贮藏第 12 d，辐照组与对照组的差异不显著 ($p > 0.05$)，从贮藏 12 d 开始，1 KGy 组和其他组相比差异显著 ($p < 0.05$)，1 KGy 组的活性高于 2 kGy 组，说明 1 KGy 组能较好的抑制微生物的生长；同时能更好的延缓菇体组织的老化。

3 讨论

辐照保鲜是一种新型的保鲜方式，它的原理是通过打破化学键，去除电子形成离子，自由基或 ROS，并诱导水分解^[29]。Xiong Q 等^[30]人研究发现合适剂量的辐照可以抑制双孢菇开伞和发生褐变，降低了微生物污染的水平，并且延长了双孢蘑菇的保质期，而对感官特性没有特别的影响。新鲜蘑菇采后变质的速率直接与初始微生物的负荷有关，伽玛射线单独使用或与冷藏结合已被证明通过减少水分损失、改善颜色和外观来延长货架寿命^[31]。而高剂量辐照的缺点是破坏细胞分子氧进入细胞质，加快了氧化，引起褐变发生。

针对工厂化生产的大宗香菇来说，辐照保鲜技术可以实现批量处理，在杀灭有害微生物、控制食源性污染的风险的同时，同时不改变香菇的自身的形貌，合适的剂量处理不仅不损耗其营养成分，而且还可以延长其货架期。其中我们关注的是辐照处理对香菇自身代谢中酶的应激反应，因为酶是活体组织中有催化功能的蛋白质，可调节组织细胞中特定的生化过程，对生物体内的代谢起重要调节作用。

本研究中的超氧化物歧化酶 (SOD) 和谷胱甘肽还原酶 (GR) 与香菇酶促抗氧化能力有密切关系；本研究中的苯丙氨酸解氨酶、纤维素酶和几丁质酶与香菇的质构变化有密切关系。

其中苯丙氨酸解氨酶与多酚代谢和木质素的形成有关，而纤维素酶和几丁质酶与香菇细胞壁成分的调节有关。本研究中重点关注辐照处理对香菇贮藏过程中抗氧化相关酶和质构相关酶活的调控变化规律，为延缓菇体衰老，保持菇体营养和感官品质提供科学依据，同时为高品质鲜香菇的物流贮藏提供技术支撑。

4 结论

4.1 香菇在采后容易受到外界环境和自身酶活等影响而发生品质劣变，因此，采后保鲜的技术非常重要。辐照保鲜是一种无损的保鲜方式，能够实现产业化。

4.2 通过综合分析不同辐照剂量对鲜香菇的微生物含量、质构特性、颜色变化以及相关酶等活性指标的影响可知，相比其他剂量而言，其中 1 KGy 的辐照剂量结合低温贮藏能较好地抑制其品质劣变，能延长香菇的贮藏期限达到 16~20 d。

4.3 辐照处理能够有效地抑制采后香菇中的微生物侵染发生。对香菇辐照的剂量越大，杀菌效果越好，很大的抑制其嗜温菌、霉菌和酵母菌的数量增长，很好的延缓了菇体的腐烂。

4.4 香菇采后发生环境应激反应，组织内活性氧水平提高，导致其氧化产物积累，从而发生褐变。低剂量的辐照处理能延缓其 SOD 活性和 GR 活性的降低。木质素、纤维素和几丁质等成分的增加是香菇采后品质劣变的主要原因之一。由实验可知低辐照剂量能延缓 PAL 活性的增加，抑制纤维素酶活性和几丁质酶活性的降低，达到了抑制其老化的作用。综合分析相关酶活性在贮藏过程中的变化可知 1 KGy 的抑制香菇老化的效果较好。

参考文献

- [1] 刘晓,闫语婷.香菇的营养价值及综合利用现状与前景[J].食品工业,2017,3:207-210

- LIU Xiao, YAN Yu-ting. The nutritive value and comprehensive utilization status and prospects of *Lentinus Edodes* [J]. Food Industry, 2017, 3: 207-210
- [2] 周晓庆.新鲜香菇包装保鲜中的关键技术研究[D].重庆:西南大学,2011
- ZHOU Xiao-qing. Research on the key techniques of packaging and fresh keeping of fresh *Lentinus Edodes* [D]. Chongqing: Southwest University, 2011
- [3] 罗伟,李东.香菇多糖的研究进展[J].食品与发酵工业,2000, 26(4):63-67
- LUO Yi, LI Dong. Research progress of Lentinan [J]. Food and Fermentation Industry, 2000, 26(4): 63-67
- [4] 梁巧玲.香菇食用与药用价值[J].保鲜与加工,2006,6(5):47
- LIANG Qiao-ling. Mushroom consumption and medicinal value [J]. Preservation and Processing, 2006, 6(5): 47
- [5] 陆宁,檀华蓉,杨勇胜.香菇中蛋白氨基酸成分分析[J].食品研究与开发,2002,23(6):94-95
- LU Ning, TAN Hua-rong, YANG Yong-sheng. Analysis of protein amino acids in *Lentinus edodes* [J]. Food Research and Development, 2002, 23(6): 94-95
- [6] 刘丽萍.香菇的营养价值及开发利用[J].食品研究与开发,2003,24(3):57-59
- LIU Li-ping. The nutritional value and development of mushroom [J]. Food Research and Development, 2003, 24(3): 57-59
- [7] Aguirre L, Frias J M, Barry C. Modelling browning and brown spotting of mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored in controlled environmental conditions using image analysis [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 91(2): 280-286
- [8] 李月梅.香菇产业具有良好的发展前景[J].食品科学,2005, 26(7):261-266
- LI Yue-mei. Mushroom industry has a good development prospect [J]. Food Science, 2005, 26(7): 261-266
- [9] 叶静君,韩晓祥,励建荣.低温气调对香菇保鲜影响研究[C].中国食品科学技术学会年会.2010
- YE Jing-jun, HAN Xiao-xiang, LI Jian-rong. Study on the effect of low-temperature air-tempering on the preservation of *Lentinus edodes* [C]. Annual Meeting of China Food Science and Technology Society. 2010
- [10] 刘燕,卢立新.香菇气调保鲜包装工艺研究[J].食品与发酵工业,2007,33(11):155-158
- LIU Yan, LU Li-xing. Study on modified atmosphere preservation packaging technology of *Lentinus edodes* [J]. Food and Fermentation Industries, 2007, 33(11): 155-158
- [11] Jiang T, Feng L, Li J. Changes in microbial and postharvest quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) treated with chitosan-glucose complex coating under cold storage [J]. Food Chemistry, 2012, 131(3): 780-786
- [12] 姜天甲.主要食用菌采后品质劣变机理及调控技术研究[D].杭州:浙江大学,2010
- JIANG Tian-jia. Research on post-harvest quality deterioration mechanism and control technology of major edible fungi [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010
- [13] Xing Z, Wang Y, Feng Z, et al. Effect of 60Co-irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Hypsizygus marmoreus* fruit bodies [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2007, 55(20): 8126
- [14] 李华佳,单楠,杨文建,等.食用菌保鲜与加工技术研究进展[J].食品科学,2011,32(23):364-368
- LI Hua-jia, SHAN Nan, YANG Wen-jian, et al. Research progress on the preservation and processing technology of edible fungi [J]. Food Science, 2011, 32(23): 364-368
- [15] Kume T, Furuta M, Todoriki S, et al. Status of food irradiation in the world [J]. Radiation Physics & Chemistry, 2009, 78(3): 222-226
- [16] 乔勇进,张娜娜,戚文元,等.食用菌采后生理及保鲜技术研究及展望[J].上海农业学报,2015,6:145-149
- QIAO Yong-jin, ZHANG Na-na, QI Wen-yuan, et al. Research and prospect of postharvest physiology and fresh-keeping technology of edible fungi [J]. Shanghai Journal of Agricultural Sciences, 2015, 6: 145-149
- [17] Jiang T, Luo S, Chen Q, et al. Effect of integrated application of gamma irradiation and modified atmosphere packaging on physicochemical and microbiological properties of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 761-767
- [18] 李志啸,杨文建,方东路,等.纳米包装材料对双孢菇细胞壁代谢及品质的影响[J].食品科学,2016,37(6):248-253
- LI Zhi-xiao, YANG Wen-jian, FANG Dong-lu, et al. Effects of Nano-packaging materials on cell wall metabolism and quality of *Agaricus bisporus* [J]. Food Science, 2016, 37(6): 248-253
- [19] 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
- [20] 曹建康,姜微波.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo. Postharvest physio-biochemical experiment instruction for fruits and

- vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [21] Zivanovic S, Busher R W, Kim K S. Textural changes in mushrooms (*agaricus bisporus*) associated with tissue ultrastructure and composition [J]. Journal of Food Science, 2000, 65(8): 1404-1408
- [22] 韩春然, 闫宝军, 唐均安. 香菇采后贮藏期间褐变的因素研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(11): 1441-1444
HAN Chun-ran, YAN Bao-jun, TANG Jun-an. Study on the factors of browning during postharvest storage of *Lentinus edodes* [J]. Modern Food Science & Technology, 2012, 28(11): 1441-1444
- [23] Alim W, Peerzadar H, Raghuvеers M, et al. Effect of gamma irradiation and sulphitation treatments on keeping quality of white button mushroom *Agaricus bisporus* (J. Lge) [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 44(5): 967-973
- [24] 叶蕙, 陈建勋, 余让才, 等. γ 辐照对草菇保鲜及其生理机制的研究[J]. 核农学报, 2000, 14(1): 24-28
YE Hui, CHEN Jian-xun, YU Rang-cai, et al. Research on fresh-keeping and physiological mechanism of straw mushroom by gamma irradiation [J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2000, 14(1): 24-28
- [25] 高雪. 植物苯丙氨酸解氨酶研究进展[J]. 现代农业科技, 2009, 1: 30-33
GAO Xue. Advances in research on plant phenylalanine ammonia lyase [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009, 1: 30-33
- [26] Danqing L, Xiaoyi Q, Pingping T, et al. Toughening and its association with the postharvest quality of king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*) stored at low temperature [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 1092-1100
- [27] Jiang T, Wang Q, Xu S, et al. Structure and composition changes in the cell wall in relation to texture of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) stored in modified atmosphere packaging [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 90(5): 742
- [28] Zivanovic S, Buescher R, Kim S K. Mushroom texture, cell wall composition, color, and ultrastructure as affected by pH and temperature [J]. Journal of Food Science, 2003, 68(5): 1860-1865
- [29] Palafoxcarlos H. Maintaining antioxidant potential of fresh fruits and vegetables after harvest [J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2015, 55(6): 806-822
- [30] Xiong Q L, Xing Z T, Feng Z Y, et al. Effect of ^{60}Co -irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Pleurotus nebrodensis* [J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(1): 157-161
- [31] Ajlouni S O, Beelman R B, Thompson D B. Influence of gamma irradiation on quality characteristics, sugar content, and respiration rate of mushrooms during postharvest storage [J]. Developments in Food Science, 1993