

文章编号:1000-8551(2019)03-0490-08

# $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对鲜香菇保鲜效果的初步研究

周冉冉<sup>1,3</sup> 高虹<sup>1</sup> 范秀芝<sup>1</sup> 殷朝敏<sup>1</sup> 陈浙娅<sup>1</sup>姚芬<sup>1</sup> 程薇<sup>4</sup> 史德芳<sup>1,2,\*</sup>

(<sup>1</sup>湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所/国家食用菌加工技术研发分中心/湖北省农业科技创新中心农产品加工分中心,湖北 武汉 430064;<sup>2</sup>华中农业大学食品科学技术学院,湖北 武汉 430070;<sup>3</sup>湖北工业大学生物工程与食品学院,湖北 武汉 430064;<sup>4</sup>湖北省农业科学院经济作物研究所,湖北 武汉 430064)

**摘要:**为研究 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 和电子束2种射线的不同剂量对新鲜香菇采后保鲜效果的影响,本试验通过测定新鲜香菇的硬度、呼吸强度、电导率、感官品质等指标,筛选2种辐照射线的最优剂量,并对比分析最优辐照处理下香菇细胞的微观结构。结果表明, $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线中,2 kGy 剂量组香菇硬度降幅为37%,呼吸强度为 $10.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,相对电导率为0.268%,均小于其他剂量组;电子束射线中,3 kGy 剂量组香菇硬度降幅为38%,呼吸强度为 $10.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,相对电导率为0.241%,均小于其他剂量组。综合感官分析可知,3 kGy 电子束组和2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线组香菇的保鲜效果分别优于同类射线其他剂量组。显微分析可知,与2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线相比,3 kGy 电子束辐照能够较好地保持新鲜香菇的菌丝形态,延缓其进一步降解,从而延长其贮藏期。本研究探索了辐照在香菇保鲜过程中的可行性,为推动电子束辐照技术和 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 辐照技术在香菇保鲜领域的应用提供了可靠的理论依据与技术支持。

**关键词:**鲜香菇;  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线; 电子束; 辐照; 贮藏品质

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.03.0490

香菇(*Lentinus edodes*)含有多种有益人体健康的活性成分,具有较高的食用和药用价值。近年来,国内外香菇消费模式发生了巨大变化,从消费干香菇为主逐渐转向干、鲜消费并重,鲜香菇消费量与日俱增。随着国际国内现代物流业和冷链技术的不断发展,香菇跨区域、长距离运输的需求迅速增长<sup>[1-2]</sup>。新鲜香菇作为鲜活农产品,在采后会因贮藏不当而发生品质裂变<sup>[3]</sup>。目前,食用菌的保鲜方法主要有气调<sup>[4]</sup>、低温冷藏<sup>[5]</sup>、抗氧化剂涂膜浸渍<sup>[6]</sup>等,但这些方法均存在一些缺点,如专用气调设备投资高、操作程序复杂、保鲜效果不理想、处理量有限、处理效率低等。因此,寻求一种成本低、安全环保、操作简便的香菇保鲜方法十分必要。

$^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照和电子束辐照是一种非热型杀菌技术。 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线在食品辐照方面的研究较成熟,应用也较广泛;电子束辐照在辐射安全和环保方面具

有较大的优势,且电子加速器装置的不断完善拓宽了其在保鲜领域的应用前景,但该辐照技术尚未在保鲜领域规模化应用<sup>[7]</sup>。Xiong等<sup>[8]</sup>研究 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线对新鲜白灵菇的品质特性和相关酶活性的影响,发现1.2 kGy 剂量能有效抑制其品质劣变;Sommer等<sup>[9]</sup>研究 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照双孢菇后5'-核苷酸、酪氨酸和苯丙氨酸含量的变化,发现5'-核苷酸含量显著降低,但酪氨酸和苯丙氨酸含量并无显著变化;Duan等<sup>[10]</sup>发现电子束辐照处理双孢菇能够推迟细胞软化,延缓膜脂质过氧化速率。 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束的产生原理和作用机制不尽相同,其对香菇保鲜效果的差异研究尚鲜见报道。故本研究分别采用 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束2种不同射线辐照鲜香菇,通过对比同组射线不同辐照剂量对鲜香菇品质的影响,筛选出每种射线的最优剂量,再结合电镜观察对比2种不同射线的最优剂量组香菇细胞形态和结构的变化,以期确定最终保鲜效果

收稿日期:2017-10-27 接受日期:2018-03-06

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)

作者简介:周冉冉,女,主要从事(药)食用菌功能食品开发研究。E-mail:129843749@qq.com

\* 通讯作者:史德芳,男,副研究员,主要从事(药)食用菌功能食品开发研究。E-mail:2392013889@qq.com

最好的保鲜条件,为鲜香菇采后的贮运保鲜提供技术支持。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与amp;仪器

1.1.1 供试材料 挑选大小色泽成熟度基本一致的新鲜香菇,购自三友(随州)食品有限公司。将筛选出的香菇用PBI保鲜袋密封保存,每袋10个,共50袋。 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线处理,剂量分别为0(对照)、1、2、3 kGy;电子束辐照处理,剂量分别为0(对照)、1、2、3、4、5 kGy。每组剂量辐照5袋香菇。将处理后的香菇于温度 $4\pm 1^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $80\%\pm 10\%$ 条件下贮藏,分别在贮藏后第0、第4、第8、第12、第16天测定相关试验指标,0 kGy剂量组为对照组。PBI包装袋 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 透过量分别为15 850.880、68 994.750  $\text{cm}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot 24\text{h}\cdot 0.1\text{MPa}$ 。

1.1.2 主要仪器与设备  $^{60}\text{Co}$ 辐照装置(装源量25.5万居里),湖北省辐照实验中心;5MeV-100 kV高频高压电子加速器,武汉爱邦高能技术公司;RE-52二氧化碳测定仪,上海亚荣生化仪器厂;TA-XT Plus食物物性测试仪,英国SMS公司;DDB-303A电导率仪,上海雷磁仪器厂;GQ-160气调保险箱,广州标际包装设备有限公司;NIKON ECLIPSE CI正置光学显微镜,尼康仪器(上海)有限公司。

### 1.2 试验方法

1.2.1 香菇硬度的测定 参照李铁华<sup>[11]</sup>的方法并稍作改动。利用物性测试仪中的P/36R探头进行硬度测定,将去柄的蘑菇菌盖固定在操作台上,探头以 $5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的穿刺速率进行下压,下压深度为样品高度的一半,通过力与时间的作用曲线,以最大峰值力( $N_{\text{max}}$ )为硬度指标。

1.2.2 香菇呼吸强度的测定 采用 $\text{CO}_2$ 测定仪读取起始时和结束时的 $\text{CO}_2$ 含量,按照公式计算香菇的呼吸强度:

$$X = \frac{(W_1 - W_2) \times V \times M}{V_0 \times m \times t} \times 100 \quad (1)$$

式中, $X$ :呼吸强度( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ); $W_1$ :测定前密闭容器中 $\text{CO}_2$ 含量(%); $W_2$ :测定后密闭容器中 $\text{CO}_2$ 含量(%); $V$ :密闭容器总体积(L); $M$ : $\text{CO}_2$ 的摩尔质量( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ); $V_0$ :测定温度下的 $\text{CO}_2$ 摩尔体积( $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$ ); $m$ :样品质量(g); $t$ :测定时间(h)。

1.2.3 香菇电导率的测定 参照姜宏志等<sup>[12]</sup>的方法并稍作改进。将香菇用蒸馏水清洗干净,用滤纸吸干

表面多余的水分,从香菇正中心取1g左右的方形样品放入装有50 mL纯净水的小烧杯中,30℃水浴10 min后测定烧杯中浸提液的电导率 $L_1$ ,然后100℃水浴5 min,自然冷却至30℃时测定烧杯中浸提液的电导率 $L_2$ 。按照公式计算相对电导率(conductivity, $L$ ):

$$L = L_1/L_2 \times 100\% \quad (2)$$

1.2.4 感官评定 采用定量描述检测法<sup>[12]</sup>。感官评价小组由9位具有相关专业知识的组成,香菇感官品质评定指标分别是色泽、风味、外观,所占的权重分别是30%、40%、30%,具体判定标准见表1。当评价总分低于2分时,表示香菇已经达到贮藏期限,具体判定标准见表2。

表1 香菇感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation index of *Lentinus edodes*

评价指标 Evaluation index	评价标准 Evaluation standard	得分 Score
色泽 Color(30%)	表面颜色新鲜,菌褶白色或乳白色	4
	表面颜色正常或有轻度褐变	3
	表面中度褐变,菌褶颜色变暗	2
	表面严重褐变,有霉斑产生	1
风味 Flavor(40%)	有香菇特有的香味	4
	特有的香味不明显或无气味	3
	部分产生酸味	2
形态 Shape(30%)	产生明显有霉腐味或酸味	1
	没有开伞	4
	轻微开伞	3
	部分开伞	2
	完全开伞	1

表2 食用菌总体感官评价得分判定标准

Table 2 Determination of sensory evaluation of *Lentinus edodes*

评分标准 Scoring standard	所有品质很好	品质较好	部分品质好	品质一般	品质达到贮藏期限	品质差	品质很差
总分 Total score	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0

1.2.5 香菇微观结构分析 参照丁改秀等<sup>[13]</sup>的方法并稍作改进。取香菇菌盖组织,利用石蜡切片技术处理,经FAA固定,梯度乙醇脱水,二甲苯透明并用石蜡包埋。切片厚度为8  $\mu\text{m}$ ,切片依次经二甲苯脱蜡、番红-固绿染色、乙醇梯度脱水、中性树胶封片后,在显微镜下观察并采集照片。

### 1.3 数据处理

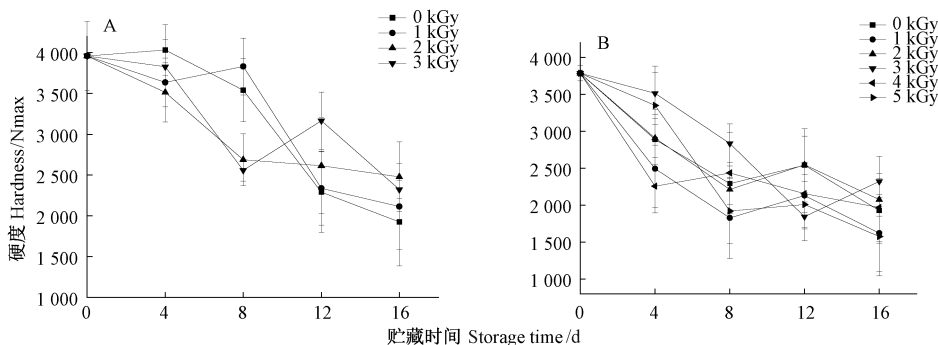
试验数据以平均值±标准差表示,采用 OriginPro 8 SR3 软件进行绘图,SPSS 21.0 对数据进行显著性分析,显著水平  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对香菇硬度的影响

硬度是判断香菇新鲜程度的重要指标之一<sup>[14]</sup>。 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对香菇硬度均产生了一定的

影响。由图 1-A 可知,整个贮藏期内香菇硬度整体呈降低的趋势,不同 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线剂量处理的香菇硬度下降程度不同,其中贮藏第 16 天时,2 kGy 剂量组香菇硬度降幅为 37%,低于对照组(51%)和其他剂量组。姜天甲<sup>[14]</sup>研究  $\gamma$  射线结合气调对香菇保鲜效果的影响,发现 1 kGy 和 1.5 kGy 剂量组能显著延缓香菇硬度的下降,延缓其软化过程。由图 1-B 可知,贮藏第 16 天时,电子束组中 3 kGy 剂量组香菇硬度降幅为 38%,低于对照组(49%)和其他剂量组,这与戚蓉迪等<sup>[15]</sup>和黄略略等<sup>[16]</sup>的研究结果类似。



注:A:  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线处理;B: 电子束射线处理。下同。

Note: A:  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray treatment. B: Electron beam ray treatment. The same as following.

图 1 不同射线处理下香菇保鲜过程中硬度的变化

Fig.1 Changes of hardness of *Lentinus edodes* by different treatment

### 2.2 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对香菇呼吸强度的影响

呼吸作用是影响香菇贮藏保鲜的关键指标之一<sup>[17]</sup>。辐照处理可以抑制香菇采后的呼吸作用,以达到降低香菇的营养消耗量、提高香菇食用价值和延长香菇贮藏期的目的。由图 2-A 可知,贮藏前期(0~4 d),对照组和 1 kGy 剂量组香菇呼吸强度增加,而 2 kGy、3 kGy 剂量组呼吸强度下降;贮藏后期(4~16 d),1 kGy 和 3 kGy 剂量组香菇呼吸强度出现上下波动,但整体呈下降趋势,对照组和 2 kGy 剂量组香菇呼吸强度逐渐降低。贮藏第 16 天,2 kGy 剂量组呼吸强度为  $10.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,低于对照组和其他 2 个剂量组,且整个贮藏期内没有较大的呼吸波动,说明 2 kGy 剂量处理能有效抑制香菇呼吸速率并减少体内营养物质消耗量。姜天甲<sup>[14]</sup>研究也发现 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照处理能够在一定程度上抑制香菇的呼吸速率,且当辐照量为 2 kGy 时处理的效果最好。由图 2-B 可知,电子束辐照后,6 组香菇呼吸强度呈先升高后下降的趋势。2、4 和 5 kGy 剂量组香菇呼吸强度在 8~12 d 出现上下波

动,而对照、1 kGy 和 3 kGy 剂量组香菇呼吸强度从第 4 天开始逐渐下降。贮藏第 16 天,3 kGy 剂量组香菇呼吸强度为  $10.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ,低于对照组和其他 4 个剂量组。上述结果表明,辐照剂量为 3 kGy 时,对香菇呼吸作用影响较小。

### 2.3 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对香菇保鲜中电导率的影响

细胞膜完整性与被测植物组织水浸提液的电导率相关,相对电导率低,说明细胞膜系统完整性较好,反之,说明细胞膜系统受损害严重<sup>[18]</sup>。由图 3 可知,香菇贮藏期间的电导率整体呈上升趋势,说明随着贮藏时间的延长,香菇细胞膜的完整性逐渐降低。在整个贮藏期,2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线处理组香菇电导率较对照组和其他 2 个剂量组上升缓慢且相对电导率最低;3 kGy 电子束处理组香菇电导率较对照组和其他 4 个剂量组上升缓慢且相对电导率最低。叶蕙等<sup>[19]</sup>研究  $\gamma$  射线对草菇保鲜及其生理机制的影响,发现辐照对膜脂过氧化过程有抑制作用,从而保持了膜结构的完整性。因此,2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和 3 kGy 电子束的保鲜效果较

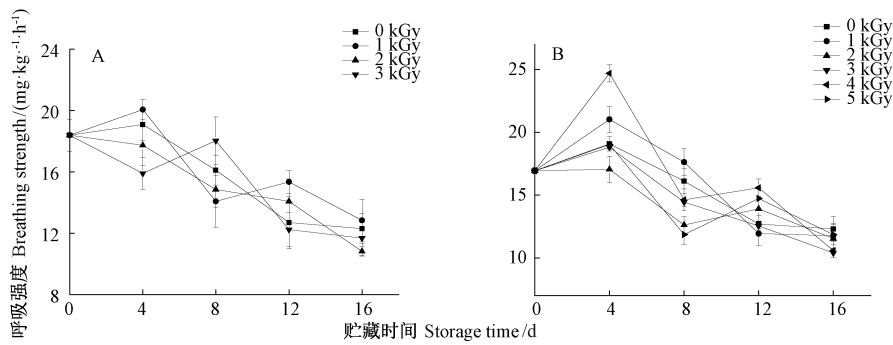


图 2 不同射线处理下香菇保鲜过程中呼吸强度的变化

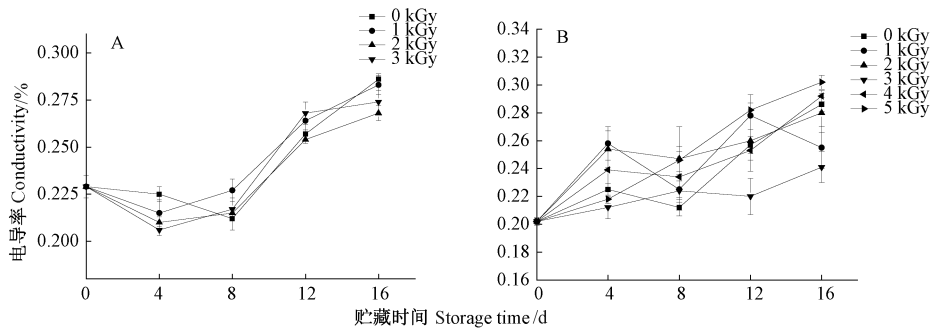
Fig.2 Changes in respiration intensity of *Lentinula edodes* by different treatment

图 3 不同射线处理下香菇电导率的变化

Fig.3 Changes in conductivity of *Lentinus edodes* by different treatment

好于同射线其他剂量组,能够抑制细胞膜的过氧化程度,维持细胞完整性。

#### 2.4 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对香菇保鲜感官品质的影响

由表 3、表 4 可知,在贮藏 8 d 内不同  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线处理组无显著性差异;贮藏第 16 天,3 个  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线处理组感官品质均显著优于对照组 ( $P < 0.05$ ),其中,2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线处理组感官品质显著优于其他处理组 ( $P < 0.5$ )。由表 5、表 6 可知,在贮藏前 4 d 不同剂量电子束处理组之间差异不显著;贮藏第 16 天,5 组电子束处理组感官品质均显著优于对照组 ( $P < 0.5$ ),其中,3 kGy 电子束处理组感官品质显著优于其他组 ( $P < 0.5$ )。

#### 2.5 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线和电子束辐照对香菇菌丝体显微结构的影响

由图 4 可知,贮藏 8 d 内,香菇菌丝体之间的网状结构致密且分布均匀,网间空隙较小。贮藏 8 d 后,2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线、3 kGy 电子束辐照的香菇菌丝体组成网间空隙变大,但变化不明显,对照组样品的菌丝体

开始降解较快,视野内的菌索数目明显减少;随着贮藏期的延长,网状结构间的空隙逐渐变大,对照组的菌丝体失去了网状结构,大部分菌丝已经解聚,菌丝体细胞自溶,2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线组的网状均匀性明显变差,而 3 kGy 电子束组还能保持网状结构。贮藏第 8 天,对照组香菇菌丝体结构变得更松散,网间空隙进一步加大,视野内菌索明显减少,更多菌丝体细胞出现自溶现象。综上,辐照处理能够抑制香菇子实体中菌索的降解,延缓菌丝体细胞自溶的发生,延长香菇的贮藏期。

### 3 讨论

香菇组织软化及硬度降低可能与其细胞组织的完整性有关。香菇贮藏过程中微生物可能会破坏香菇组织<sup>[14]</sup>。本试验结果表明,2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和 3 kGy 电子束辐照处理均能抑制香菇组织变软,这可能是由于辐照能杀死微生物并抑制相关酶活性,从而保证细胞不被破坏,达到保鲜的效果。Zivanovic 等<sup>[20]</sup>认为香菇软化可能与其细胞壁的降解及微生物的侵染有关,

表3  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线处理下不同贮藏期香菇感官评定结果Table 3 Sensory evaluation results of *Lentinula edodes* treated with  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray at different storage time

贮藏时间 Storage time/d	指标 Index	辐照剂量 Irradiation dose/kGy			
		0	1	2	3
4	色泽	4.00±0.00a	4.00±0.00a	4.00±0.00a	4.00±0.00a
	风味	4.00±0.00a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a
	形态	3.89±0.33a	4.00±0.00a	4.00±0.00a	3.89±0.33a
8	色泽	3.78±0.44a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a
	风味	3.67±0.50a	3.78±0.44a	3.89±0.33a	3.78±0.44a
	形态	3.67±0.50a	3.56±0.53a	3.67±0.50a	3.33±0.50a
12	色泽	2.78±0.67a	3.11±0.33ab	3.44±0.53b	3.11±0.33ab
	风味	2.22±0.83a	2.33±0.71a	2.78±0.67a	2.22±0.67a
	形态	1.78±0.67a	1.44±0.53a	2.67±0.50b	1.56±0.73a
16	色泽	1.67±0.50a	2.33±0.50b	2.67±0.50b	2.22±0.44b
	风味	1.33±0.50a	1.78±0.44b	2.00±0.00b	1.67±0.50ab
	形态	1.22±0.44a	1.11±0.33a	1.78±0.44b	1.11±0.33a

注:同行不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the line mean significant difference at 0.05 level. The same as following.

表4  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线处理下不同贮藏期时香菇感官评定总分表Table 4 Sensory evaluation of *Lentinus edodes* treated with  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray at different storage time

贮藏时间 Storage time/d	辐照剂量 Irradiation dose/kGy			
	0	1	2	3
4	3.97±0.10a	3.96±0.13a	3.96±0.13a	3.92±0.23a
8	3.70±0.26a	3.74±0.23a	3.82±0.17a	3.68±0.18a
12	2.26±0.46a	2.30±0.44a	2.94±0.44b	2.29±0.43a
16	1.40±0.15a	1.74±0.32b	2.13±0.22c	1.67±0.34a

表5 电子束辐照处理下不同贮藏期时香菇感官评定结果

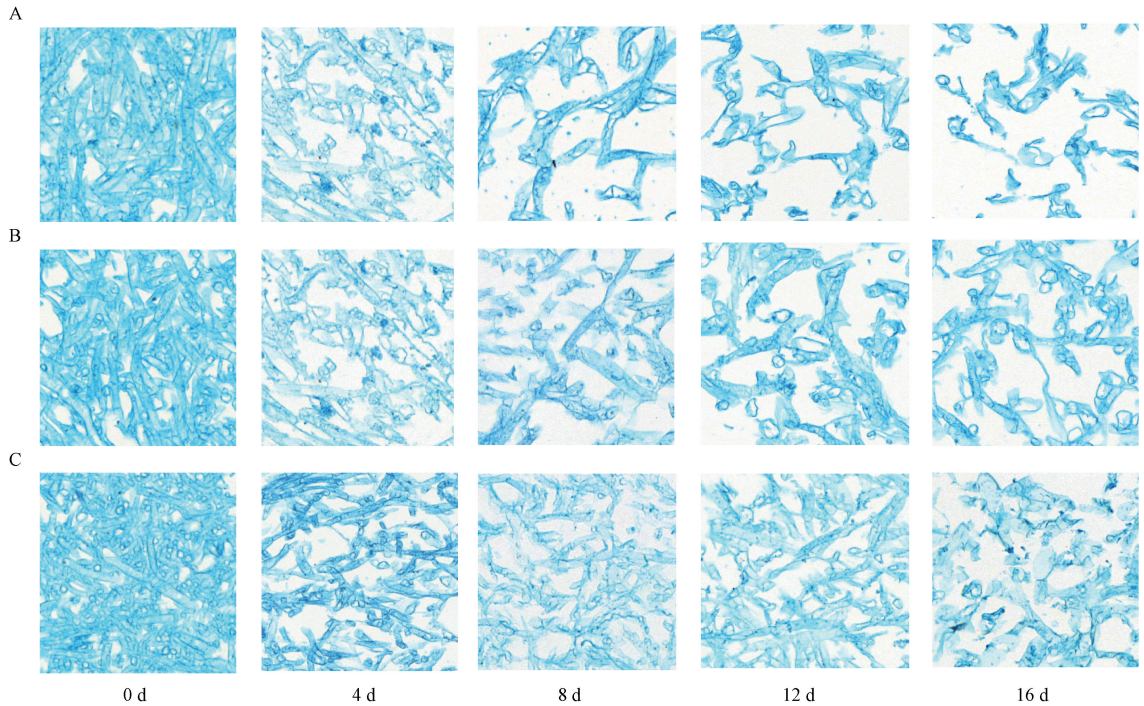
Table 5 Sensory evaluation results of *Lentinus edodes* treated with electron beam irradiation at different storage time

贮藏时间 Storage time/d	指标 Index	辐照剂量 Irradiation dose/kGy					
		0	1	2	3	4	5
4	色泽	4.00±0.00a	4.00±0.00a	4.00±0.00a	4.00±0.00a	4.00±0.00a	4.00±0.00a
	风味	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a
	形态	4.00±0.00a	4.00±0.00a	4.00±0.00a	3.89±0.33a	4.00±0.00a	4.00±0.00a
8	色泽	3.67±0.50a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a	3.89±0.33a
	风味	2.78±0.44a	3.78±0.44a	3.89±0.33a	3.78±0.44a	3.78±0.44a	3.78±0.44a
	形态	2.89±0.60a	3.67±0.50b	3.78±0.44b	3.56±0.53b	3.67±0.50b	3.67±0.50b
12	色泽	2.78±0.67a	3.11±0.33ab	3.44±0.53bc	3.67±0.50c	3.11±0.33ab	3.11±0.33ab
	风味	2.00±0.71a	2.33±0.71ab	2.78±0.67b	2.78±0.44b	2.22±0.67ab	2.33±0.71ab
	形态	1.78±0.67ab	1.89±0.33ab	2.67±0.50c	2.00±0.50b	1.44±0.53a	1.44±0.53ab
16	色泽	1.22±0.44a	2.33±0.50b	2.67±0.50b	2.78±0.44b	2.33±0.50b	2.33±0.50b
	风味	1.33±0.50a	1.89±0.33bc	2.00±0.00bc	2.11±0.33c	1.67±0.50ab	1.44±0.53a
	形态	1.22±0.44a	1.11±0.33a	2.13±0.22b	1.78±0.24b	1.11±0.33a	1.11±0.33a

表 6 电子束辐照处理下不同贮藏期时香菇感官评定总分表

Table 6 Sensory evaluation of *Lentinus edodes* with electron beam irradiation at different storage time

贮藏时间 Storage time/d	辐照剂量 Irradiation dose/kGy					
	0	1	2	3	4	5
4	3.96±0.13a	3.96±0.13a	3.96±0.13a	3.92±0.23a	3.96±0.13a	3.96±0.13a
8	3.08±0.32a	3.78±0.24b	3.86±0.17b	3.74±0.23b	3.78±0.24b	3.78±0.24b
12	2.17±0.42a	2.43±0.36a	2.94±0.44b	2.81±0.29b	2.26±0.38a	2.30±0.41a
16	1.27±0.16a	1.79±0.28b	2.13±0.22c	2.21±0.24c	1.70±0.36b	1.61±0.26b



注:A:对照组;B:2 kGy $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线辐照处理;C:3 kGy 电子束处理。

Note: A: Control group. B: 2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray irradiation treatment. C: 3 kGy electron beam treatment.

图 4 不同射线处理下香菇菌丝体的显微结构变化 ( $\times 40, 50 \mu\text{m}$ )Fig.4 Changes in microstructure of *Lentinus edodes* mycelia treated with different treatment ( $\times 40, 50 \mu\text{m}$ )

较高辐照剂量可能造成其有效成分的降解,因此,辐照能抑制香菇硬度下降。

香菇在采摘后,体内各种代谢活动仍在继续进行,其中呼吸作用是香菇采后最主要的生理活动之一<sup>[19]</sup>。香菇呼吸强度的大小可以反映其贮藏特性。由于香菇普遍含水量较高,呼吸作用旺盛,较高的呼吸强度加快了营养物质的消耗,使得香菇极不耐贮藏。本研究结果表明,2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和 3 kGy 电子束辐照的香菇呼吸速率低于同射线的其他剂量,能明显抑制呼吸速率。前人也得出了诸多相似的结论,如王秋芳等<sup>[21]</sup>认为 0.4、0.7、1.0 kGy 的电子束处理能显著抑制巨峰葡萄的呼吸强度;陈召亮等<sup>[22]</sup>研究发现电子束处理能

明显抑制鲜切西洋芹的呼吸作用;周任佳等<sup>[23]</sup>在研究高能电子束辐照对鲜切哈密瓜生理生化品质的影响时发现,电子束 0.5、1.0、1.5 kGy 辐照处理能明显抑制鲜切哈密瓜呼吸速率。

膜完整性与功能的丧失是衰老初期的基本特征。植物组织的衰老与生物膜的降解密切相关<sup>[24]</sup>。本研究发现 2 kGy  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  射线和 3 kGy 电子束处理均能有效抑制香菇电导率的增加,从而保持细胞膜的完整,延缓细胞组织的衰老。王梅等<sup>[25]</sup>研究发现洋葱油复合保鲜剂处理山药可以降低相对电导率,保持细胞膜透性,延缓组织变老,维持其新鲜度。

香菇的菌丝体由许多管状细丝交织而成,是香菇

的营养器官。香菇的子实体是由双核菌丝体形成。香菇新鲜样品的菌丝体之间网状结构致密且分布均匀, 界线清晰, 网间空隙较小; 贮藏一定时间后, 菌丝体开始自溶, 是菌丝细胞中有机物质分解的结果<sup>[26-27]</sup>。本研究结果表明, 与<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线辐照相比, 电子束辐照能较好地保持菌丝体的网状结构, 可能与电子束的自身特性有关, 电子加速器辐照产生的自由基信号强度低于<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线的, 具有一定的还原性, 对细胞的损伤较小<sup>[28-29]</sup>。

## 4 结论

本研究结果表明, 一定剂量的辐照能有效延缓鲜香菇的组织变软, 抑制其呼吸强度, 提高细胞膜完整性。其中, 2 kGy <sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线和 3 kGy 电子束辐照处理香菇的保鲜效果较明显, 在 4 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C, 相对湿度 80% $\pm$ 5% 的环境下贮藏 16 d, 能较好抑制保持其形态特征的变化, 有利于保持其商品价值。

## 参考文献:

- [1] 河南食用菌网. 我国香菇产业的发展趋势 [EB/OL]. (2017-07-31) [2017-10-10] <http://www.henansyj.com/article/view.aspx?id=11718200910589f833090000>
- [2] 中国食用菌商务网. 反季节香菇-夏日菌菇市场里的“夺金点” [EB/OL]. (2000-07-18) [2017-10-10] <http://www.mushroommarket.net/special/show.php?itemid=54>
- [3] 刘颖. 香菇的保鲜技术[J]. 吉林农业, 2002(1): 36-36
- [4] 应丽莎, 周晓庆, 赵东方, 张敏. 低氧气调包装对新鲜香菇品质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(4): 277-283
- [5] 叶静君, 励建荣, 韩晓祥, 姜天甲. 香菇低温贮藏中不同部位的生理生化变化[J]. 中国食品学报, 2012(3): 137-144
- [6] Jafri M, Jha A, Bunkar D S, Ram R C. Quality retention of oyster mushrooms (*Pleurotus florida*) by a combination of chemical treatments and modified atmosphere packaging [J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 76(1): 112-118
- [7] Guerreiro D, Madureira J, Silva T, Melo R, Santos P M P, Ferreira A, Trigo M J, Falcão A N, Margaca F M A, Verde S C. Postharvest treatment of cherry tomatoes by gamma radiation: microbial and physicochemical parameters evaluation [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 36: 1-9
- [8] Xiong Q L, Xing Z T, Feng Z Y, Tan Q, Bian Y B. Effect of <sup>60</sup>Co- $\gamma$  irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Pleurotus nebrodensis* [J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(1): 157-161
- [9] Sommer I, Schwartz H, Solar S, Sontag G. Effect of gamma-

- irradiation on flavour 5'-nucleotides, tyrosine, and phenylalanine in mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Chemistry, 2010, 123(1): 171-174
- [10] Duan Z F, Xing Z T, Shao Y, Zhao X Y. Effect of electron beam irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of the white button mushroom, *Agaricus bisporus* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(17): 9617-9621
- [11] 李铁华. 硅窗气调包装延长茶树菇贮藏期的工艺及机理研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2007: 67
- [12] 姜宏志, 齐玲, 么宏伟, 吴洪军, 冯磊. 一种榆耳天然复合防腐剂应用于香菇保鲜的研究 [J]. 中国林副特产, 2015(5): 25-28
- [13] 丁改秀, 王保明, 王小原, 仓国营, 陈晓斌, 牛兴艳, 纪薇, 张鹏飞, 温鹏飞. 壶瓶枣果实发育过程中果柄导管形态变化与裂果关系 [J]. 中国农业科学, 2014, 47(24): 4886-4894
- [14] 姜天甲. 主要食用菌采后品质裂变机理及调控技术 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 80
- [15] 戚蓉迪, 颜伟强, 岳玲. 电子束辐照对进口甜樱桃保鲜效果的影响 [J]. 核农学报, 2014, 28(5): 839-844
- [16] 黄略略, 乔方, 方长发. 电子束辐照对糯米糍荔枝采后保鲜效果的研究 [J]. 食品工业, 2015, 36(2): 143-146
- [17] 陶菲. 真空预冷处理延长白蘑菇贮藏期的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2006: 8
- [18] 姜天甲. 短波紫外线处理对香菇采后品质的影响 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 108-112
- [19] 叶蕙, 陈建勋, 余让才, 陈巧玲, 刘伟.  $\gamma$  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
- [20] 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, 2010, 65(8): 1404-1408
- [21] 王秋芳, 陈召亮, 乔勇进. 高能电子束辐照对巨峰葡萄保鲜效果的研究 [J]. 核农学报, 2010, 24(2): 319-324
- [22] 陈召亮, 方强, 王海宏, 乔勇进. 电子束辐照对鲜切西洋芹的保鲜效应 [J]. 上海农业学报, 2010, 26(2): 9-13
- [23] 周任佳, 乔勇进, 王海宏. 高能电子束辐照对鲜切哈密瓜生理生化品质的影响 [J]. 核农学报, 2012, 26(2): 300-305
- [24] 赵鑫, 张继澍, 王敏. CaCl<sub>2</sub> 和 GA<sub>3</sub> 处理对枣果采后衰老和膜脂过氧化物的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2003, 31(2): 118-124
- [25] 王梅, 徐俐, 王美芬, 汤静. 复合保鲜剂对鲜切山药保鲜效果的影响 [J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 134-140
- [26] 黄毅. 食用菌栽培 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998
- [27] C J 阿历索保罗, C W 明斯, M 布莱克韦尔. 菌物学概论 [M]. 姚一建, 李玉, 译. 北京: 中国农业出版社, 2002
- [28] 耿胜荣, 熊光权, 夏和舟. 不同剂量率辐照对酵母抽提物自由基和挥发成分的影响 [J]. 现代食品科技, 2014(6): 168-173
- [29] 邓文敏, 陈浩, 裴颖. 高能电子加速器在食品辐照加工中的应用分析 [J]. 核农学报, 2012, 26(6): 919-923

# Preliminary Comparison of Preservation Effect of Fresh *Lentinus Edodes* by $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ Ray and Electron Beam Irradiation

ZHOU Ranran<sup>1,3</sup> GAO Hong<sup>1</sup> FAN Xiuzhi<sup>1</sup> YIN Chaomin<sup>1</sup>  
CHEN Zheyu<sup>1</sup> YAO Fen<sup>1</sup> CHENG Wei<sup>4</sup> SHI Defang<sup>1,2,\*</sup>

(<sup>1</sup> Agricultural Products Processing Subcenter of Hubei Agricultural Science & Technology Innovation Center/ National R&D Center For Edible Fungi Processing/Research Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology Academy of Agricultural Sciences, Hubei, Wuhan 430064; <sup>2</sup> College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Hubei, Wuhan 430070; <sup>3</sup> College of Bioengineering and Food Science, Hubei University of Technology, Hubei, Wuhan 430064; <sup>4</sup> Institute of Economic Crops, Hubei Academy of Agricultural Science, Hubei, Wuhan 430064)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different doses of gamma ray and electron beam irradiation technique on the postharvest quality of fresh *Lentinus edodes*, changes in firmness, respiration, conductivity, sensory characteristics and cell structure and morphology of fresh *Lentinus edodes* after irradiation were measured. The results showed that with a 2 kGy  $^{60}\text{Co}$  gamma ray irradiation treatment, a high level of firmness (37% reduction) was maintained, lower respiration ( $10.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) and relative conductivity (0.268%), compared to the other groups by  $^{60}\text{Co}$  gamma ray irradiation after storage for 16 d; while 38% reduction in firmness,  $10.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  respiration and relative conductivity with a value of 0.241% than other electron beam groups were observed with 3 kGy electron beam irradiation treatment. Sensory analysis showed that the electron beam using 3 kGy,  $^{60}\text{Co}$  gamma ray with 2 kGy retards mushroom sensory deterioration and therefore has better preservation effect on fresh *Lentinus edodes*. Microscopic analysis showed that compared with 2 kGy  $^{60}\text{Co}$  gamma ray, 3 kGy electron beam irradiation could keep the morphology of fresh *Lentinus edodes* well, delay its further degradation and prolong its storage period effectively. This paper explored the feasibility of irradiation in the preservation of fresh mushrooms, indicating that gamma-irradiation and electron-beam, might be a useful mushroom conservation technology.

**Keywords:** fresh *Lentinus edodes*,  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  ray, electron beam, irradiation, storage quality