

低剂量电子束辐照对香菇采后抗氧化能力的影响

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

(1. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 发酵工程教育部重点实验室, 工业发酵湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430068) (2. 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)

(3. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 新鲜香菇采后易腐烂, 为提高其采后贮藏品质, 本研究采用 1.0、2.0 和 3.0 kGy 的电子束辐照剂量对鲜香菇进行辐照处理, 贮藏于 4±1 °C、湿度为 80%±5% 的环境, 以色泽、总酚含量、丙二醛含量、DPPH 自由基清除能力和相关抗氧化酶 (SOD、CAT) 活性为评价指标, 研究低剂量电子束辐照处理对鲜香菇抗氧化能力的影响。结果表明: 在贮藏过程中相比其他剂量, 2.0 kGy 辐照剂量能延缓香菇褐变, 保持总酚含量处在较高水平, 能够减少丙二醛含量的积累, 贮藏末期其含量仅为 0.54 nmol/g。2.0 kGy 辐照剂量能较好的清除 DPPH 自由基以及保持 SOD、CAT 较高活性水平, SOD 和 CAT 活性仅降低 3.78%、27.90%, 与其它组相比有显著差异。由上可知, 2.0 kGy 电子束辐照处理能够使香菇采后保持较高的抗氧化活性水平, 从而延迟香菇自身的衰老氧化反应, 延长了贮藏保鲜期。

关键词: 电子束; 辐照; 香菇; 抗氧化能力

文章编号: 1673-9078(2019)12-70-76

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.12.010

Effect of Postharvest Low Dose Electron Beam Irradiation on the Antioxidant Capacity of *Lentinula edodes*

ZHANG Yu¹, ZHOU Ran-ran^{1,2}, GAO Hong², CHEN Zhe-ya², FAN Xiu-zhi², YING Chao-ming², YAO Fen², SHI De-fang^{2,3}

(1. Key Laboratory of Fermentation Engineering, Ministry of Education, School of Food and Biological Engineering, Hubei University of Technology, Hubei Collaborative Innovation Center for Industrial Fermentation, Wuhan 430068, China) (2. Institute for Farm Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

(3. Huazhong Agricultural University School of Food Science and Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Fresh *Lentinula edodes* are susceptible to decay after harvest. In order to improve its post-harvest storage quality, fresh *Lentinula edodes* were subjected to electron-beam irradiation at doses of 1.0, 2.0 and 3.0 kGy in this study, before a storage at 4±1 °C and 80%±5% relative humidity. Then, the effect of low dose electron beam irradiation on the antioxidant capacity of fresh *Lentinula edodes* was examined based on the evaluation indices such as color, total phenol content, malondialdehyde content, DPPH radical scavenging ability, and activities of antioxidant enzymes (SOD and CAT). The results showed that compared with other doses, the treatment at 2.0 kGy could delay the browning of *Lentinula edodes*, maintain the total phenol content at a relatively high level, and reduce the accumulation of malondialdehyde (only 0.54 nmol/g at the end of storage). The irradiation dose of 2.0 kGy exhibited significant differences as compared to other groups: scavenged significantly more DPPH free radicals, and maintained higher activities of SOD and CAT (which decreased only by 3.78% and 27.90%, respectively). The above results indicated that electron beam irradiation at 2.0 kGy can enable fresh *Lentinula edodes* to maintain high post-harvest antioxidant activity thereby delaying the oxidation reaction in *Lentinula edodes* and prolonging its postharvest shelf life.

Key words: electron beam; irradiation; *Lentinula edodes*; antioxidant capacity

收稿日期: 2019-05-24

基金项目: 湖北省技术创新专项 (重大项目) (2017ABA148); 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: 张玉 (1982-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 功能性食品加工及发酵工程

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

香菇 (*Lentinula edodes*), 又称为香菌、花菇, 是主要的食用菌之一。鲜香菇具有独特的香气, 含有麦角甾醇、香菇多糖等多种生物活性成分^[1-4]。目前香菇的消费模式产生了明显的变化, 主要趋势有两点: 一、逐步由干制转变成鲜食为主, 二、随着国际国内现代物流业的发展和冷链技术的完善, 香菇跨区域、长距离运输的需求迅速增长。在贮运过程中, 由于蘑菇自身的呼吸和蒸腾作用的加强, 以及微生物腐败的加剧, 菇体逐渐出现褐变、萎焉和溃烂等品质下降现象, 极大地降低了鲜香菇的货架期; 香菇没有外皮保护, 在运输过程中容易受到机械损伤^[5], 因此, 保持鲜香菇的贮藏品质的同时, 如何寻求一种适合规模化处理的保鲜方式成为业界所关注的热点。

电子束辐照技术是利用电子加速器产生的电子束射线作用于对象, 使之发生常规方法难以引发的物理、化学及生物学反应, 从而使产品的品质或性能得以改善或保持的过程^[6]。相对于传统的加工技术, 电子束辐照加工技术利用较强穿透能力的射线深入到物质内部进行加工, 具有反应易于控制, 没有化学残留、处理时间短、加工流程简单、适宜产业化和规模化生产等优势。电子束在保持采后果蔬抗氧化特性方面已有广泛应用^[7]。然而不恰当的电子束辐照工艺将产生过量的自由基。自由基能引起蛋白质、核苷酸等多种生物大分子氧化损伤, 自由基积累会对组织细胞造成不同程度的伤害, 如损伤细胞膜导致的酶和底物接触进而引发褐变, 将对果蔬抗氧化特性乃至贮藏品质产生不利的影响。植物体内的自由基清除体系包括SOD、CAT等抗氧化酶以及酚类等抗氧化物质, 它们与植物组织的抗氧化活性以及果实的成熟衰老密切相关^[7]。Fernandes^[8]等报道电子束辐照处理能够延长新鲜蘑菇的货架期。电子束辐照技术已经应用于食用菌采后处理中^[9,10], 但是电子束辐照对鲜香菇的贮藏品质的影响鲜有报道。徐丽婧^[11]等应用电子束辐照保鲜双孢蘑菇发现辐照剂量是影响辐照效果的主要因素。斯琴图雅^[12]等研究发现适宜剂量的电子束辐照能够有效保持滑菇的自然色泽, 抑制组织的腐败和开伞。Yurttas^[13]等研究发现选择适宜的辐照剂量对提高其采收抗氧化能力, 延缓衰老劣变及改善贮藏品质具有重要的作用。因此, 选择适合剂量是亟需解决的问题。

本文采用电子束对新鲜香菇进行辐照处理, 采用不同辐照剂量(水平)处理后在 $4\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度为 $80\%\pm 5\%$ 的环境下进行贮藏试验, 通过测定色泽、丙二醛含量、DPPH·清除能力、总酚含量以及相关的抗氧化酶活性等品质指标, 考察对其抗氧化能力的影响, 确定出最佳辐照剂量, 为鲜香菇辐照保鲜技术提供可

行性。

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。挑选大小相同, 外观一致, 未开伞并且无机械损伤的新鲜香菇, 将其分为4组, 每组15袋, 每袋10个, 每组每次实验选取三袋。4组香菇分别做以下处理: (1) 不做任何处理, 0.0 kGy 作为对照组; (2) 1.0 kGy 电子束辐照组; (3) 2.0 kGy 电子束辐照组; (4) 3.0 kGy 电子束辐照组。处理结束后放置 $4\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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

没食子酸、福林酚、硫代巴比妥酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、聚乙烯吡咯烷酮 k30、蛋氨酸、核黄素、乙二胺四乙酸二钠盐、EDTA、硼酸、硼砂, 国药集团化学试剂有限公司; 氮蓝四唑, Sigma 公司; 二硫苏糖醇、2,2-联苯基-1-苦基肼基, 上海麦克林生物化学有限公司。

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; 10 MeV-20 kW 高能直线电子加速器, 武汉爱邦高能技术公司。

1.3 实验方法

1.3.1 色泽的测定

用 CR-400 色彩色差计对香菇的色泽进行测定, 参照 Jiang^[14]等的方法稍作改动。测量位置为香菇菇盖纵切面, 平行测定三次 L^* 、 a^* 、 b^* 值。 ΔE 值表示与理想颜色值相比, 香菇色泽变化的程度, ΔE 值和褐变指数(BI) 计算公式如下:

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

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

其中: L^* 表示白色, L^* 值越小表示越黑, a^* 表示红绿, b^* 表示黄蓝, 每个香菇理想的颜色值是 $L_0=97$, $a_0=-2$, $b_0=0$ 。

1.3.2 总酚含量测定

采用福林酚法, 总酚含量以没食子酸为标准品计算, 参照 Li^[15]等的方法稍作改动。

1.3.3 丙二醛含量测定

采用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛含量, 参照

Jamjumroon^[16]等人的方法稍作改动。

1.3.4 清除 DPPH 自由基能力的测定

采用分光光度法测定清除 DPPH 自由基能力, 参照 Fernandes^[17]等人的方法稍作改动。

1.3.5 超氧化物歧化酶活性测定

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑光化还原 (NBT) 法, 参照曹建康^[18]等人的方法进行测定。

1.3.6 过氧化氢酶活性测定

采用 Xiong^[19]等人的方法稍作改进, 测量在 240 nm 下 H_2O_2 消失的初始速率来确定过氧化氢酶 (CAT)

活性。

1.4 数据处理

每组样品平行测定三次, 数据用平均值±标准差来表示。采用 SPSS 22.0 软件对所有实验数据进行 ANOVA 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 贮藏期内香菇色泽的变化

表 1 贮藏期内香菇色泽的变化

Table 1 Changes in color of *Lentinula edodes* during storage

贮藏时间/d	辐照剂量/kGy			
	0.0	1.0	2.0	3.0
0	9.81±0.31 ^a	9.81±0.31 ^a	9.81±0.31 ^a	9.81±0.31 ^a
4	10.14±0.28 ^a	11.37±0.40 ^b	10.91±0.18 ^b	10.36±0.23 ^a
8	10.19±0.12 ^b	11.36±0.37 ^{ab}	11.74±1.02 ^b	10.30±0.58 ^b
12	11.66±0.42 ^b	12.16±0.37 ^b	11.80±0.20 ^b	13.76±1.16 ^a
16	12.77±1.59 ^b	13.58±0.47 ^{ab}	12.67±0.45 ^b	15.29±0.86 ^a

注: 同行字母不同代表差异性显著 ($p<0.05$), 下表同。

表 2 贮藏期内香菇褐变指数的变化

Table 2 Changes of browning index of *Lentinula edodes* during storage

贮藏时间/d	辐照剂量/kGy			
	0.0	1.0	2.0	3.0
0	1.11±0.21 ^a	1.11±0.21 ^a	1.11±0.21 ^a	1.11±0.21 ^a
4	1.11±0.14 ^b	1.37±0.13 ^a	1.56±0.05 ^a	1.37±0.12 ^a
8	0.73±0.04 ^c	1.18±0.11 ^b	1.66±0.42 ^a	1.26±0.04 ^{ab}
12	1.79±0.86 ^a	1.22±0.04 ^a	1.47±0.01 ^a	1.70±0.20 ^a
16	1.33±0.16 ^b	1.74±0.14 ^a	1.67±0.10 ^a	1.71±0.17 ^a

在贮藏过程, 香菇的生命活动仍在延续, 由于香菇组织衰老和贮藏环境的影响, 香菇细胞膜结构发生变化或破坏, 酚类与酶接触, 并在空气中氧气的作用下使组织发生褐变, 影响其品质, 褐变度可用来判断香菇内部组织褐变的情况^[20]。由表 1 可知, 随着贮藏时间的延长, 不同处理组之间香菇色泽 ΔE 值逐渐增加, 表明与香菇的理想色泽相差逐渐增大。在贮藏第 4 d, 2.0 kGy 组香菇色泽 ΔE 值为 10.91, 2.0 kGy 组与对照组香菇色泽出现显著差异 ($p<0.05$), 而在贮藏第 16 d, 2.0 kGy 组与对照组香菇色泽 ΔE 值分别为 12.67 和 12.77, 无显著差异 ($p>0.05$)。由表 2 可知, 2.0 kGy 组的褐变指数为 1.67, 低于其他辐照组的褐变指数, 说明 2.0 kGy 组的褐变程度低于其他辐照处理组。这与吴海霞^[21]等人研究结果相类似。

2.2 贮藏期内香菇总酚含量的变化

酚类物质的积累是植物对非生物胁迫的反应^[22], 酚类化合物的积累不仅受到酚类合成速率的影响, 而且与细胞的生理状态有很大关系, 是细胞组织合成和代谢之间平衡的结果^[23]。酚类物质的积累能够增强蘑菇的抗菌能力^[24]。酚类物质的氧化是影响采后香菇组织色泽褐变的主要因素, 严重影响采后香菇的外观品质和商品价值^[25]。应激水平影响氧化因子和抗氧化成分之间的动态平衡^[26], 其中蘑菇的抗氧化能力与其含有的酚类化合物有较大关系^[27], 电子束辐照处理鲜香菇使得香菇组织发生应激反应, 酚类化合物用作抗氧化剂, 可以通过关键途径的代谢诱导进行富集。由图 1 可以看出, 4 组不同处理的香菇在贮藏期间总酚含量

是呈逐渐上升趋势,辐照处理激发了酚类物质的合成,3.0 kGy 组香菇总酚含量上升趋势较缓慢,可能由于辐照剂量提高产生了较多的活性自由基,消耗了组织中的酚类物质。在贮藏第 16 d, 2.0 kGy 组香菇总酚含量为 53.51 ± 3.64 mg/g, 显著高于 3.0 kGy 组和 0.0 kGy 组 ($p < 0.05$)。

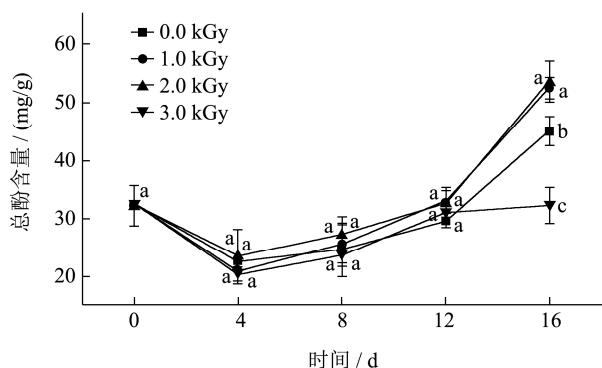


图 1 贮藏期内香菇总酚含量的变化

Fig.1 Changes of total phenolics content of *Lentinula edodes* during storage

注: 同列字母不同代表差异性显著 ($p < 0.05$)。下图同。

2.3 贮藏期内香菇丙二醛含量的变化

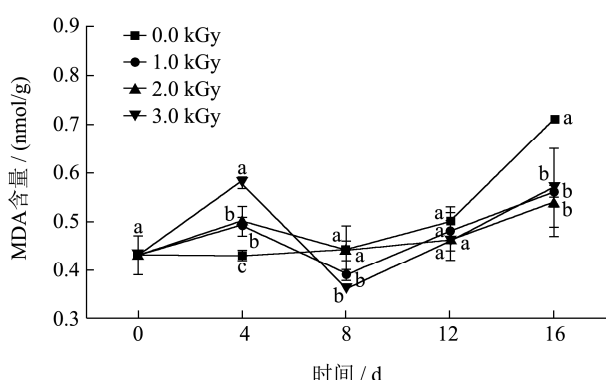


图 2 贮藏期内香菇丙二醛含量的变化

Fig.2 Changes of MDA content of *Lentinula edodes* during storage

植物器官衰老或在逆境下遭受伤害, 往往会发生膜脂过氧化作用, 丙二醛(MDA)是膜脂氧化的最终产物, 是膜系统受损害的重要标志^[28]。如图 2 所示, 四组香菇的 MDA 含量在贮藏期间均呈上升趋势, 处理组均呈现先上升后下降再上升的变化过程。在贮藏第 4 d, 香菇中 MDA 含量出现显著差异 ($p < 0.05$)。在贮藏第 16 d, 2.0 kGy 组的 MDA 含量为 0.54 nmol/g, 均显著低于其它组 ($p < 0.05$), 在整个贮藏期间 2.0 kGy 组 MDA 含量上升较缓慢, 说明 2.0 kGy 组香菇膜脂氧化的程度较低, 香菇品质较好。这与已研究的结果相似^[29]。

2.4 贮藏期内香菇清除 DPPH 自由基能力的变化

清除 DPPH 自由基能力可以代表香菇的抗氧化水平^[30,31], 四组不同处理香菇的清除 DPPH 自由基能力如图 3 所示, 在贮藏第 4 d, 四组不同处理香菇的清除 DPPH 自由基能力达到了峰值, 且显著差异 ($p < 0.05$)。随着贮藏时间的延长, 清除 DPPH 自由基能力逐渐降低, 2.0 kGy 组下降较为平缓, 较好的保持了贮藏过程中香菇的抗氧化能力, 在贮藏第 16 d, 四个不同处理组香菇的清除 DPPH 自由基能力依次分别为 84.59%、83.97%、85.2%和 84.48%, 2.0 kGy 组与 1.0 kGy 组差异较为明显 ($p < 0.05$), 与 0.0 kGy 组和 3.0 kGy 组不显著 ($p > 0.05$)。这与 Jiang^[28]等人发现合适的辐照处理的香菇具有更高的 DPPH 清除能力的结论相一致。

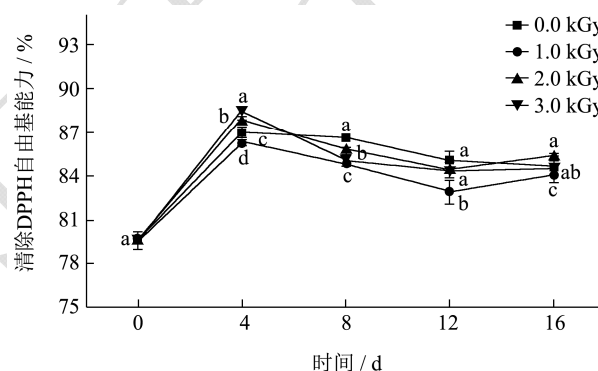


图 3 贮藏期内香菇清除 DPPH 自由基能力的变化

Fig.3 Changes of clear DPPH free radical ability of *Lentinula edodes* during storage

2.5 贮藏期内香菇 SOD 活性的变化

超氧化物歧化酶(SOD)是生物体防御机制中一种重要的酶, 是作为一种内源活性氧清除剂, 能够在逆境后衰老过程中清除植物体内过量的活性氧, 维持氧化代谢平衡, 保持膜结构的完整性, 从而在一定程度上延缓植物器官的衰老进程^[32]。如图 4 所示, 四个不同处理组贮藏期内香菇 SOD 活性是呈降低趋势的; 在贮藏前 4 d, 四个不同处理组 SOD 活性差异不显著 ($p > 0.05$); 在贮藏第 8 d, SOD 活性呈现缓慢上升的趋势, 并且达到峰值, SOD 酶活峰值的出现可能是与辐照诱发自由基的产生相关的^[29]。在贮藏第 16 d, 四个不同处理组 SOD 活性分别为 2.87 U/g、3.00 U/g、3.05 U/g 和 2.81 U/g, 差异不显著 ($p > 0.05$)。SOD 在辐照和对照组中都降低, Duan^[10]等人研究发现酶活性和辐照剂量没有明显的关系。

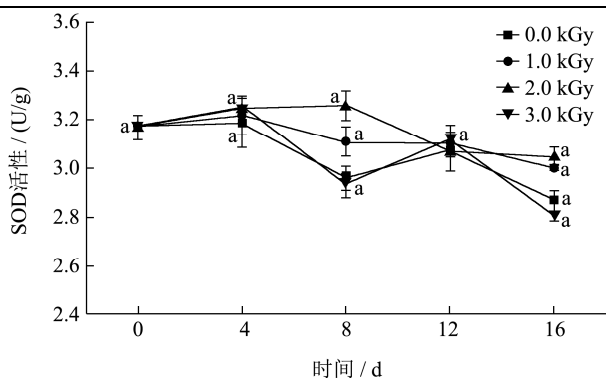


图4 贮藏期内香菇 SOD 活性的变化

Fig.4 Changes of SOD activity of *Lentinula edodes* during storage

2.6 贮藏期内香菇 CAT 活性的变化

CAT 是一种内源活性氧清除剂,能清除植物体内过量的活性氧,维持代谢平衡,一定程度上延缓细胞的衰老进程^[33]。由图 5 可知,四个不同处理组贮藏期内香菇 CAT 活性是呈降低趋势的;在贮藏前 8 d,四个不同处理组 CAT 活性差异不显著 ($p>0.05$);在贮藏第 16 d,2.0 kGy 组下降趋势缓慢,0.0 kGy、1.0 kGy、2.0 kGy 和 3.0 kGy 组下降率分别为 35.70%、33.71%、27.90%、37.49%,说明 2.0 kGy 组 CAT 活性较高于其他组,能较好的维持氧化代谢平衡,调节氧化反应的进行。相比而言,Duan^[10]等使用电子束处理双孢蘑菇研究对抗氧化酶活性的影响,发现相比其他辐照剂量,1.0 kGy 辐照样品中过氧化氢酶的活性下降趋势较小,由此可知,要通过对具体的原料特性考察,才能选择适宜的辐照工艺及剂量。

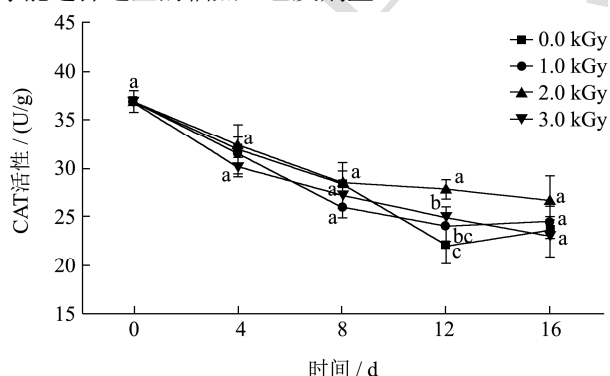


图5 贮藏期内香菇 CAT 活性的变化

Fig.5 Changes of CAT activity of *Lentinula edodes* during storage

3 结论

3.1 高能电子束作用于食用菌子实体可产生活性自由基,通过射线的直接作用和自由基的间接作用,可有效杀死微生物,抑制酶活,延缓膜脂过氧化,从而

达到控制微生物感染和虫害,防止霉变,延缓褐变,保护膜质完整性等作用,同时可抑制菌伞开张及菌柄延长^[34]。值得注意的是针对不同辐照方式而言,辐照剂量的高低直接影响其营养品质及抗氧化状态,选择的适宜的辐照剂量也至关重要。本试验采用电子束辐照的方式,2.0 kGy 的辐照剂量保持了鲜香菇较高的抗氧化水平。

3.2 本研究中,采用电子束辐照香菇考察对其抗氧化能力的影响,发现在贮藏过程中,相比其他剂量,2.0 kGy 辐照剂量能抑制香菇发生褐变,保持总酚含量处在较高水平;2.0 kGy 辐照组的丙二醛含量为 0.54 nmol/g,较对照组降低 23.94%;2.0 kGy 辐照剂量能较好的清除 DPPH 自由基以及保持 SOD、CAT 较高活性水平。一般而言,SOD 与多酚化合物的含量和抗氧化活性成正比^[35],而本研究中,SOD 的活性与辐照剂量没有显著相关性。

3.3 Mami^[9]等应用电子束辐照考察对双孢蘑菇货架期的影响,认为辐照通过影响其抗氧化成分来提高营养价值。Villarodriguez^[36]等认为电子束是最有效的提高抗氧化物含量的电离辐射源。本研究的开展可为电子束辐照保鲜香菇的选择提供技术支持与数据支撑。

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
- [2] LIU Xiao, YAN Yu-ting. The nutritive value and comprehensive utilization status and prospects of *Lentinula edodes* [J]. Food Industry, 2017, 3: 207-210
- [3] 梁巧玲.香菇食用与药用价值[J].保鲜与加工,2006,6(5):47-47
- [4] LIANG Qiao-ling. Mushroom consumption and medicinal value [J]. Preservation and Processing, 2006, 6(5): 47-47
- [5] 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
- [6] LUO Yi, LI Dong. Research progress of *Lentinan* [J]. Food and Fermentation Industry, 2000, 26(4): 63-67
- [7] 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
- [8] LIU Li-ping. The nutritional value and development of mushroom [J]. Food Research and Development, 2003, 24(3): 57-59
- [9] 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

- [6] Villarodriguez J A, Palafoxcarlos H, Yahia E M, et al. Maintaining antioxidant potential of fresh fruits and vegetables after harvest [J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2015, 55(6): 806-822
- [7] Lee J, Koo N, Min D B. Reactive oxygen species, aging, and antioxidative nutraceuticals [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2010, 3(1): 21-33
- [8] Ângela Fernandes, Antonio A L, Oliveira M B P P, et al. Effect of gamma and electron beam irradiation on the physico-chemical and nutritional properties of mushrooms: A review [J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 641-650
- [9] Mami Y, Peyvast G, Ziaie F, et al. Improvement of shelf life and postharvest quality of white button mushroom by electron beam irradiation [J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2013, 38(4): 1673-1681
- [10] Duan Z, Xing Z, Shao Y, et al. Effect of electron beam irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of the white button mushroom *Agaricus bisporus* [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(17): 9617-9621
- [11] 徐丽婧,高丽朴,王清,等.辐照保鲜技术及其在双孢蘑菇保鲜中的应用[J].食品工业科技,2014,35(9):392-395
XU Li-jing, GAO Li-pu, WANG Qing, et al. Irradiation preservation technology and its application in the preservation of *Agaricus bisporus* [J]. Food Industry Science and Technology, 2014, 35(9): 392-395
- [12] 斯琴图雅,王强,张玉宝,等.电子束辐照对滑菇保鲜效果的影响[J].安徽农业科学,2018,2:166-168
SI Qin-tuya, WANF Qiang, ZHANG Yu-bao, et al. Effects of electron beam irradiation on the fresh-keeping effect of mushrooms [J]. Anhui Agricultural Sciences, 2018, 2: 166-168
- [13] Yurttas Z S, Moreira R G, Castellperez E. Combined vacuum impregnation and electron-beam irradiation treatment to extend the storage life of sliced white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(1): 39-46
- [14] Jiang T J, 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
- [15] Li D, Qin X, Tian P, et al. Toughening and its association with the postharvest quality of king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*) stored at low temperature [J]. Food Chemistry, 2015, 196: 1092-1100
- [16] 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]. Parasite Immunology, 2013, 20(5): 241-247
- [17] Ângela Fernandes, Antonio A L, Barreira J C M, et al. Effects of gamma irradiation on the chemical composition and antioxidant activity of *Lactarius deliciosus* L. wild edible mushroom [J]. Food & Bioprocess Technology, 2013, 6(10): 2895-2903
- [18] 曹建康,姜微波.果蔬采后生理生化实验指导[M].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]. China Light Industry Press, 2007
- [19] Xiong Q L, Xing Z T, Feng Z Y, et al. Effect of ⁶⁰Co γ-irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of *Pleurotus nebrodensis* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 157-161
- [20] 李艳杰,郭玉曦,丁树东,等.1-MCP 和壳聚糖处理对香菇采后抗氧化能力的影响[J].食品科技,2018,43(11):43-49
LI Yan-jie, GUO Yu-xi, DING Shu dong, et al. Effects of 1-MCP and chitosan treatment on postharvest antioxidant capacity of *Lentinus edodes* [J]. Food Science, 2018,43(11): 43-49
- [21] 吴海霞.60 Co γ 射线辐照对平菇采后生理及贮藏品质的影响[J].食品科学,2014,35(18):241-245
WU Hai-xia. Effects of 60 Co γ-ray Irradiation on postharvest physiology and storage quality of *Pleurotus ostreatus* [J]. Food Science, 2014, 35(18): 241-245
- [22] Dong J, Zhang M, Lu L, et al. Nitric oxide fumigation stimulates flavonoid and phenolic accumulation and enhances antioxidant activity of mushroom [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1220-1225
- [23] Oufedjikh H, Mahrouz M, Amiot M J, et al. Effect of γ-irradiation on phenolic compounds and phenylalanine ammonia-lyase activity during storage in relation to peel injury from peel of *Citrus clementina* Hort. ex. Tanaka [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2000, 48(2): 559-565
- [24] Benoît M A, D'Aprano G, Lacroix M. Effect of gamma-irradiation on phenylalanine ammonia-lyase activity, total phenolic content, and respiration of mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2000, 48(12): 6312-6
- [25] 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
- [26] 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
- [27] Jiang T, Luo Z, Ying T. Fumigation with essential oils improves sensory quality and enhanced antioxidant ability of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 692-698
- [28] Jiang T J, 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
- [29] 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
- [30] 孟德梅,奚志媛,张亚璇,等.两种采收期香菇营养品质和抗氧化能力比较[J].中国食品学报,2018,18(4):234-240
- MENG De-mei, XI Zhi-yuan, ZHANG Ya-xuan, et al. Comparison of nutritional quality and antioxidant capacity of *Lentinus edodes* in two harvesting periods [J]. Chinese Journal of Food Science, 2018, 18(4): 234-240
- [31] Adebayo E A, Daniel Martínez-Carrera, Morales P, et al. Comparative study of antioxidant and antibacterial properties of the edible mushrooms *Pleurotus levis*, *P. ostreatus*, *P. pulmonarius* and *P. tuber-regium* [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(5): 1316-1330
- [32] Ângela Fernandes, Barreira J C M, Antonio A L, et al. Study of chemical changes and antioxidant activity variation induced by gamma-irradiation on wild mushrooms: Comparative study through principal component analysis [J]. Food Research International, 2013, 54(1): 18-25
- [33] 吴海霞,陈雷.1-MCP 对平菇采后生理及贮藏品质的影响 [J].江苏农业学报,2013,29(5):1159-1165
- WU Hai-xia, CHEN Lei. Effects of 1-MCP on postharvest physiology and storage quality of *Pleurotus ostreatus* [J]. Journal of Jiangsu Agricultural University, 2013, 29(5): 1159-1165
- [34] 张娟琴.双孢菇和白灵菇采后品质及贮藏保鲜技术研究 [D].南京:南京林业大学,2010
- ZHANG Juan-qin. Study on postharvest quality and storage and fresh-keeping technology of *Agaricus bisporus* and *Pleurotus ostreatus* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010
- [35] Sarkar D, Shetty K. Metabolic stimulation of plant phenolics for food preservation and health [J]. Annual Review of Food Science & Technology, 2014, 5(5): 395
- [36] Villarodriguez J A, Palafoxcarlos H, Yahia E M, et al. Maintaining antioxidant potential of fresh fruits and vegetables after harvest [J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2015, 55(6): 806-822

(上接第 175 页)

- [25] Zhou Lei, Yang Yuling, Wang Jing-yu, et al. Effects of low fat addition on chicken myofibrillar protein gelation properties [J]. Food Hydrocolloids 2019, 90: 126-131
- [26] Brian D T, Maurice G O S, Ruth M H, et al. Effect of varying salt and fat levels on the sensory quality of beef patties [J]. Meat Science, 2012, 91: 460-465
- [27] Jimenez C F, Herrero A, Pintado T, et al. Influence of emulsified olive oil stabilizing system used for pork backfat replacement in frankfurters [J]. Food Research International, 2010, 43(8): 2068-2076
- [28] Wang Li-yan, Guo Hong-yue, Liu Xue-jun, et al. Roles of *Lentinula edodes* as the pork lean meat replacer in production of the sausage [J]. Meat Science 2019, 156: 44-51
- [29] Zakaria N A, Sarbon N M. Physicochemical properties and oxidative stability of fish emulsion sausage as influenced by snakehead (*Channa striata*) protein hydrolysate [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 94: 13-19