

## 辐照处理在农产品加工中的应用研究进展

徐浪<sup>1</sup>, 王林聪<sup>2</sup>, 焦懿<sup>2</sup>, 詹国平<sup>3</sup>, 刘涛<sup>3</sup>, 张伟锋<sup>1</sup>, 郑耘<sup>2</sup>, 余道坚<sup>1\*</sup>

(1. 深圳海关, 广东深圳 518045; 2. 深圳市检验检疫科学研究院, 广东深圳 518001; 3. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100176)

**摘要** 辐照处理是农产品加工的一种常用处理方法。根据辐照处理类型的不同对农产品辐照处理技术进行分类整理, 对不同类型农产品的处理剂量进行归纳分析, 并对辐照处理后农产品的品质影响进行总结, 以供相关人员应用参考。

**关键词** 辐照; 农产品; 品质; 影响

中图分类号 S124<sup>+</sup>.1 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)07-0014-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.07.005



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Research Progress of Irradiation Treatment in Agro-product Processing

XU Lang<sup>1</sup>, WANG Lin-cong<sup>2</sup>, JIAO Yi<sup>2</sup> et al (1. Shenzhen Customs, Shenzhen, Guangdong 518045; 2. Shenzhen Academy of Inspection & Quarantine, Shenzhen, Guangdong 518001)

**Abstract** Irradiation treatment is a common treatment method for food processing. In this paper, the technologies of food irradiation treatment were classified according to the different types of irradiation treatment, the treatment dose of different kinds of food was summarized and the quality effect of irradiated food was summarized, which provided references for the related officers.

**Key words** Irradiation; Agro-product; Quality; Influence

辐照处理是通过利用高能射线,使目标处理物发生一系列物理学效应、化学效应或生物效应,而达到所需要目的的方法。辐照形式根据射线的类型可分为 $\gamma$ 辐照、电子束(EB)辐照和X射线辐照。 $\gamma$ 辐照主要辐照源为<sup>60</sup>Co(钴)和<sup>137</sup>Ce(铯);电子束辐照是通过电子加速器对电子进行加速而形成,X射线由加速电子撞击金属靶产生<sup>[1]</sup>, $\gamma$ 辐照和EB辐照是目前使用较普遍的类型。3种辐照中电子束穿透能力最弱,其次为 $\gamma$ 射线<sup>[2]</sup>,X射线穿透力最强。由于电子束辐照具有建造和维护成本低、不产生放射性废物、易于控制、剂量率高、对产品影响较小等优点,可作为 $\gamma$ 辐照的替代方案<sup>[3-4]</sup>。

辐照处理不会对处理物产生污染和形成残留,是一种安全可靠的处理方式。世界卫生组织、国际粮农组织和国际原子能机构于1980年已经论证低于10 kGy辐照处理的食物及农产品没有毒理学危险,并在之后对于高于10 kGy剂量的辐照处理进行了论证,结果表明辐照处理安全可靠。我国对高于10 kGy辐照食物及农产品的毒理学研究表明其无毒<sup>[5]</sup>。辐照处理过程中温度变动小,可以应用于不耐高温和低温的食物及农产品的处理,稳定性较好,能够得到统一处理剂量。由于辐照本身不消耗能量,因此处理过程中能耗远低于冷、热处理。辐照处理的电子束、X射线和 $\gamma$ 射线均能够穿透普通的包装材料,处理后的产品可以避免二次污染<sup>[6]</sup>。笔者对辐照在农产品加工过程中的应用范围和作用,辐照对农产品品质的影响进行总结归纳。

## 1 辐照在农产品行业的应用范围和作用

辐照处理在农产品领域主要集中在辐照检疫处理、辐照

保鲜、辐照降解3个方面,该研究对上述3个方面的研究情况进行总结。

**1.1 检疫辐照处理** 检疫处理是辐照处理最为重要的应用,也是目前农产品领域检疫处理研究最为深入的,检疫处理可有效降低入侵生物通过进出口贸易传播的风险,阻止入侵生物建立新的栖息地<sup>[7]</sup>。目前美国、澳大利亚、印度、泰国、墨西哥、越南等国家已经接受辐照处理作为进出口货物处理方式之一<sup>[8]</sup>,同时发达国家通过在口岸设立辐照设施以满足其他未设置检疫处理设施的国家在出口货物时能够使用辐照处理<sup>[9]</sup>。辐照处理后的农产品可以突破因为检疫原因而设立的贸易壁垒,促进国际间农产品贸易<sup>[10]</sup>。

目前辐照检疫处理对象包括生鲜水果中的实蝇类昆虫、鞘翅目昆虫、蚜虫、螨虫等。高剂量辐照处理可以造成有害生物直接死亡,低剂量处理可以造成有害生物不育、组织结构变异及代谢紊乱等<sup>[11-13]</sup>。其对昆虫造成影响按照发育阶段表现为阻止昆虫幼虫化蛹<sup>[14]</sup>、成虫羽化<sup>[15]</sup>、成虫产卵及卵的孵化<sup>[16]</sup>。造成昆虫不育所需要的辐照剂量远低于杀死昆虫所需要的剂量<sup>[17]</sup>,可有效避免辐照过程中产生的负面效果和降低成本<sup>[18-19]</sup>,在制定辐照处理标准时不育剂量成为重要的参考数据。

建立针对昆虫的通用的检疫处理标准,可以简化检疫处理在政府部门审批的流程,增加检疫处理的应用能力。美国农业部动植物健康检验局(USDA-APHIS)在2001年提出250 Gy作为实蝇检疫处理通用剂量,400 Gy作为Coccidae(蚧科)、Pseudococcidae(粉蚧科)、Lepidoptera(鳞翅目)昆虫检疫处理通用剂量<sup>[20]</sup>。《国际植物保护公约(IPPC)》制定的限定性有害生物检疫处理第28号标准到2019年为止共确定了14种有害生物的辐照处理最低剂量,最高的为梨小食心虫(*Grapholita molesta*)最低吸收剂量232 Gy,其次为苹果蠹蛾(*Cydia pomonella*)最低吸收剂量200 Gy,其余有害生物辐照处理最低吸收剂量均小于200 Gy,而实蝇科(Tephritid-

**基金项目** 国家重点研发计划计划课题“跨境生物及产制品控制、无害化和再利用新技术研究”(2017YFF0210204)。

**作者简介** 徐浪(1983—),女,湖南长沙人,高级农艺师,硕士,从事植物检疫与检疫处理研究。\*通信作者,研究员,博士,从事植物检疫与检疫处理研究。

**收稿日期** 2019-08-17

ae)通用剂量为 150 Gy。Hallman<sup>[21-22]</sup>总结了目前报道的检疫处理成果,并提出了关于蚜虫、烟粉虱、象甲、蓟马、鳞翅目幼虫和成虫、粉蚧、螨虫等有害生物检疫辐照处理的可能通用剂量标准。

**1.2 辐照处理保鲜作用** 生鲜类货物是农产品贸易过程中重要的组成部分,由于生鲜类产品生产地与消费地之间通常存在一定距离,国内甚至国际间运输过程中消耗大量时间,使得部分原本短暂的货架期进一步压缩。保鲜一直是限制生鲜产品贸易的重要原因,而辐照处理可以在一定程度满足保鲜的要求,并且具有对农产品营养成分影响小、无化学残留、包装后处理无交叉感染等优点。同时辐照处理不影响真空包装、低温冷藏等其他保鲜方式的进行,联用时能够取得更好效果<sup>[23]</sup>。辐照处理主要通过高能射线处理目标产品后对生物细胞产生作用来达到保鲜作用,按照目的分为 2 类。

**1.2.1 杀灭或抑制农产品中微生物。**微生物是造成农产品变质的主要因素,杀灭微生物是保鲜的关键步骤。辐照可杀灭农产品表面的细菌、真菌,抑制微生物的增长,减轻储存过程中腐败现象<sup>[24-25]</sup>。剂量为 5 kGy 的  $\gamma$  射线辐照后肉类在不加入其他化学防腐剂的条件下可以在 -18 °C 环境中保存 9 个月以上<sup>[26]</sup>。辐照处理后微生物杀灭率可达 90% 以上,且微生物在长时间内未有大量繁殖的现象。 $\gamma$  射线对于油料中霉菌的杀灭作用效果好于电子束,辐照剂量越大其杀菌效果越好<sup>[27]</sup>。山银花中革兰氏阴性菌、需氧菌、霉菌和酵母菌经 4.5~7.5 kGy 剂量辐照后被彻底杀灭。辐照同时也是控制食源性疾病的重要措施<sup>[28]</sup>,板栗中微生物在辐照后数量下降<sup>[29]</sup>。

**1.2.2 抑制农产品自身新陈代谢。**部分生鲜农产品在收获后依然可以进行呼吸及其他新陈代谢作用,辐照通过影响酶活性抑制生鲜农产品自身新陈代谢,从而达到保鲜的目的。

辐照对 DNA 造成损伤<sup>[30]</sup>,可造成细胞分裂过程受阻,抑制生鲜农产品发芽来达到保鲜的目的,辐照剂量 0.02 kGy 可抑制大蒜发芽<sup>[31-32]</sup>。辐照后多种酶的活性发生变化,线粒体等细胞器官也受到影响<sup>[33]</sup>,造成生鲜产品出现呼吸速率减慢<sup>[34-37]</sup>,木质化进程被抑制<sup>[38]</sup>,可溶性糖和粗蛋白、总可溶物(total soluble solids)、滴定酸度(titratable acidity)、维生素 C(vitamin C)、花青素(anthocyanin content)等降解减慢。

**1.3 特定对象的降解** 杀虫剂与杀菌剂的广泛使用是农药残留的主要原因,多种市售农产品均可以检测出农残且部分产品存在超标现象<sup>[39-41]</sup>。有效降低农产品中的农残含量是提高农产品质量的重要途径,也是保障农产品安全的重要内容。

高能电子束辐照可以有效降低毒死蜱、三环唑、乐果、氯氰菊酯、敌稗等杀虫剂和除草剂含量,降解效果随着辐照强度增加而增强<sup>[42]</sup>; $\gamma$  射线和电子束可以降低菊酯类农残含量<sup>[43]</sup>。多菌灵、脲菌酯、啶酰菌胺、氟吡菌酰胺、吡唑醚菌酯、腈菌唑、啞菌环胺、啞霉胺、烯酰吗啉(Z 式)等杀菌剂在  $\gamma$  辐照后均得到有效降解<sup>[44]</sup>。

辐照处理是降解农产品中过敏原的重要方式,过敏原在

辐照后分子结构发生改变<sup>[45-46]</sup>。水产品中的血清蛋白(parvalbumin, PV)、原肌球蛋白(tropomyosin, TM)、鱼卵蛋白(如鲑鱼的硫酸鱼精蛋白)、胶原蛋白(collagen)、精氨酸激酶(arginine kinase, AK)、肌球蛋白轻链(myosin light chain, MLC)、肌钙结合蛋白(sarcoplasmic calcium binding protein, SCP)、血蓝蛋白亚基(hemocyanin subunits, HCS)等是重要的过敏原<sup>[47]</sup>,辐照后原肌球蛋白含量和致敏性降低<sup>[48]</sup>。牛奶、鸡蛋中鸡卵白蛋白(ovalbumin, OVA)及动物血清中蛋白质类过敏原,以及花生等植物中过敏原同样可以通过辐照降解<sup>[49-51]</sup>。当农产品中的过敏物质降低到低于引起过敏反应所需要的剂量(eliciting dose)后摄入是安全的<sup>[52]</sup>。

辐照可以降解农产品中抗生素,蜂蜜、海虾中浓度为 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$  氯霉素经辐照后可降解至 1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。2 kGy 辐照处理水中浓度为 20 mg/L 的氧氟沙星类抗生素,其降解效率可达 99%。乳酸左氧氟沙星(levofloxacin lactate, LVF)、头孢曲松钠(ceftriaxone sodium, CFX)、青霉素钠(benzylpenicillin sodium, BPC)和磺胺甲噁唑(sulfamethoxazole, SMZ) 4 种常见的抗生素在辐照降解后未产生对人体有害成分<sup>[53]</sup>。

## 2 辐照对农产品品质的影响

农产品在接受辐照的过程中自身也产生一定的变化,主要表现在感官品质变化、酶活性变化、成分变化等方面。辐照造成的改变其中一部分有利于农产品储存、运输、风味提升等,另一部分则对农产品口感、质地等造成不利影响(表 1)。目前我国关于辐照后品质变化的研究包含多种类型产品,如蓝莓、苹果、草莓等水果类,猪肉、牛肉、鸡肉等肉类,小麦、大米等谷物类,食用菌、南瓜等蔬菜类,同时也包含花椒、八角等调味品和食品添加剂等。

感官品质变化主要体现在外观、质地和口感等方面,感官品质对于辐照产品的接受程度产生直接影响。随着辐照剂量的增加,芒果、杨桃、番石榴等色泽参数与辐照剂量显著相关,火腿在辐照后红度降低<sup>[54]</sup>。

农产品品质也反映在自身的成分上,辐照后农产品的生理生化指标变化是辐照对农产品品质影响的另一方面。部分农产品辐照后理化性质出现一定的变化,主要体现在 pH 变化、成分结构变化等方面。TBARS 值反映丙二醛含量,用于推断脂肪氧化情况,辐照后 TBARS 值发生改变,猪肉在辐照处理后 TBARS 值升高,但火腿辐照后 TBARS 值降低,其原因可能为生成的丙二醛(MDA)被氧化为羧酸<sup>[55]</sup>。大蒜、南瓜和草莓在接受到一定剂量辐照后,其抗氧化酶 SOD、POD 活性提升<sup>[56]</sup>。辐照后 V<sub>C</sub>、可溶性固形物、花青素的降解得到有效抑制<sup>[57-58]</sup>,促进二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)、淀粉降解<sup>[59-60]</sup>。

$\gamma$  射线与电子束辐照是目前辐照应用研究的 2 种主要方式,相同剂量  $\gamma$  射线和电子束辐照处理后, $\gamma$  射线产生的影响更显著。 $\gamma$  射线对于火腿等产品颜色影响要大于电子束,电子束对于酸度、氧化等指标的影响要低于  $\gamma$  射线<sup>[61-62]</sup>。达到相同目的电子束所需要的剂量较  $\gamma$  辐照更小<sup>[63]</sup>。

表1 辐照处理对农产品品质的影响  
Table 1 Impact of irradiation on the quality of agricultural products

处理对象 Process object	处理方式 Processing mode	处理剂量 Treatment dose/kGY	辐照影响 Irradiation effect
蓝莓 Blueberry	$\gamma$	$\leq 2.5$	SOD、POD 活性提高;感官品质未下降 <sup>[64-65]</sup>
	EB	1 $\geq 2$	感官品质未下降,延长货架期 损伤细胞构造
苹果 Apple	EB	0.99	感官品质未下降 <sup>[66]</sup>
草莓 Strawberry	$\gamma$	2~3	感官品质未下降
哈密瓜 Hami melon	EB	1.5	最佳处理剂量
		2	呼吸速率增加,影响感官品质
核桃 <i>Juglans regia</i> L.	$\gamma$	0.5	最佳处理剂量 <sup>[67]</sup>
		5	加速衰老进程
香蕉 Banana	$\gamma$	0.4	感官品质和营养品质未下降,货架期延长
		1	造成生理损伤
葡萄 Grape	EB	1	抑制可溶性总糖、可滴定酸和 V <sub>C</sub> 降低,感官品质未下降
		1.5	加速褐变
橙汁 Orange juice	未知	2~10	理化性质变化不显著, V <sub>C</sub> 含量下降 <sup>[68]</sup>
小麦 Wheat	EB	0~2	感官品质未下降 <sup>[69-71]</sup>
		$\leq 3.5$	正常食用
		$\geq 3.8$	品质下降
		2~5	面团形成时间和稳定时间增加
		5	淀粉降解,不宜食用
大米 Rice	EB	2.4	感官品质未下降,黏度下降 <sup>[72-73]</sup>
		5	食用安全
		$\gamma$	0.5
花生 Peanut	$\gamma$	1~2	颜色变黄
		$\geq 2$	蒸煮后出现不良风味,品质下降
		1.5	粗纤维含量下降,品质无明显变化 <sup>[76]</sup>
芝麻 Sesame	EB	5	降低酸价
		5	降低酸价,过氧化值增加
绿豆 Mung bean	EB	0.2	降低酸价,过氧化值增加
虾 Shrimp	EB	0.2	脂肪酸和糊化液黏度升高
章鱼 Octopodidae	EB	0~9	肌球蛋白 $\alpha$ -螺旋增加, $\beta$ -折叠降低
象拔蚌 <i>Panopea abrupta</i>	EB	1	抑制腐胺、尸胺和酪胺形成 <sup>[77]</sup>
鸡肉 Chicken	EB/ $\gamma$	0~8.4	抑制生物胺增长 <sup>[78]</sup>
		2.5	提高嫩度、色度,延长保鲜期 <sup>[79]</sup>
		6	感官品质未受明显影响
牛肉 Beef	EB	$\gamma$	弹性与咀嚼性提高 <sup>[80]</sup>
		6.5	理化性质未受影响
		2.5	感官品质未受影响 <sup>[81-82]</sup>
羊肉 Mutton	$\gamma$	4	氨基酸含量增加,维生素含量降低,脂质氧化增加 <sup>[83]</sup>
猪肉 Pork	EB	$\leq 10.5$	感官品质未受影响
		4~6	色泽保持最佳
		2~6	脂肪氧化、蛋白质溶解度和非蛋白氮增加
		4	提高猪肉氧化,电子束辐照优于 $\gamma$ 射线
火腿 Ham	$\gamma$ /EB	6	感官品质可接受
香肠 Sausage	$\Gamma$	6	品质未受影响 <sup>[84]</sup>
素鸡 Vegetarian chicken	EB	8.8	不影响感官品质 <sup>[85]</sup>
彩椒 Color pepper	$\gamma$	$\leq 1.81$	维持硬度和 V <sub>C</sub> 含量 <sup>[86]</sup>
牛肝菌 Boletus	$\gamma$	1.29~3.38	挥发物降解,风味受影响 <sup>[87]</sup>
滑菇 <i>Pholiota nameko</i>	EB	0.9	提高感官品质,降低失重 <sup>[88]</sup>
羊肚菌 Morchella	EB	2	品质未受影响 <sup>[89]</sup>
双孢菇 <i>Agaricus bisporus</i>	EB	2	营养成分未受影响,延长保鲜期 <sup>[90]</sup>

续表 1

处理对象 Process object	处理方式 Processing mode	处理剂量 Treatment dose//kGY	辐照影响 Irradiation effect
鲈鱼 <i>Lateolabrax japonicus</i>	EB	3~5 4	品质未受影响,亮度增加 <sup>[91-92]</sup> 维持色度、pH 和降低水分流失
大菱鲂 <i>Scophthalmus maximus</i>	EB	10 13	热稳定性下降 <sup>[93]</sup> 疏水性降低
红鱼 <i>Lutjanus sanguineus</i>	EB	3~5 9	品质未下降,保鲜期延长 促进脂肪酸和 DHA 降解
烤鳗 Roast eel	γ	≥5	感官品质下降,促进脂肪氧化 <sup>[94]</sup>
马蹄笋 <i>Dendrocalamopsis oldhami</i>	γ	0.5~1	抑制酶活性,减缓木质化进程
南瓜 <i>Cucurbita moschata</i>	γ	0.15~0.4	无显著影响,SOD、POD 含量升高
花椰菜 <i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>botrytis</i> L.	EB	0.5~1 2	抑制呼吸作用,降低重量损失和 MDA 积累,延长保鲜期 呼吸强度升高,V <sub>C</sub> 和还原糖降解加快
大蒜 <i>Allium sativum</i> L.	γ	0.02 0.5	抑制发芽,POD、CAT、SOD、EST 活性升高 <sup>[95]</sup> 抑制呼吸作用
	EB	0.2 0.8	抑制呼吸作用 呼吸作用增强,感官品质下降
西洋芹 <i>Apium graveolens</i> Linn	EB	1~2	抑制呼吸作用、多酚氧化酶活性、V <sub>C</sub> 和可溶性固形物降解, 感官品质未受影响 <sup>[96]</sup>
榨菜 Tuber mustard	γ/EB	5	感官品质提高 <sup>[97]</sup>
紫薯粉 Purple sweet potato powder	γ	2~8	感官品质未受影响 <sup>[98]</sup>
核桃 <i>Juglans regia</i> L.	γ	0.3	降低裂果率和乙烯含量,酸值、过氧化值、羰基价、粗脂肪、 粗蛋白、脂肪酸、V <sub>E</sub> 含量降低 <sup>[99-100]</sup>
板栗 <i>Castanea mollissima</i> BL.	γ	4	感官品质和理化营养指标未下降
红茶 Black tea	γ	0~4 ≤10	茶黄素和茶氨酸含量增加 <sup>[101]</sup> 茶多酚、游离氨基酸、生物碱和浸出物总量变化不显著
蜂花粉 Bee pollen powder	γ	10	感官与风味无影响 <sup>[102]</sup>
防腐剂 Preservative	EB	5~30	无负面影响 <sup>[103]</sup>
生姜 <i>Zingiber officinale</i> Roscoe	γ	0~5	不影响感官品质 <sup>[104]</sup>
花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i> Maxim.	EB	9 15	不影响感官品质 <sup>[105]</sup> 抗氧化性下降,货架期延长 <sup>[106]</sup>
辣椒 <i>Capsicum annum</i> L.	γ	18	不影响感官品质
八角 <i>Illicium verum</i> Hook. f.	EB	6	不影响感官品质
桂皮 <i>Cinnamomum tamala</i> (Bauch. -Ham.) Nees et Eberm	EB	6	不影响感官品质
白酒 Liquor	γ	1.97	总酸、总酯、乙酸乙酯、乳酸乙酯含量增加 <sup>[107]</sup>
	EB	≤1.5	不影响感官品质,具催陈效果 <sup>[108]</sup>

### 3 讨论与展望

近年来辐照处理在我国发展迅速,主要体现在设施建设、政策完善等方面。根据中国广核集团有限公司的材料显示,沿海地区电子束辐照设施近年来快速增长,中国-东盟凭祥水果辐照检疫处理中心等设施也开始启用<sup>[109]</sup>。电子束辐照具有精准、高效、易于控制等优势,由于无辐照源,不产生放射性废物,更加安全环保,是目前国内发展的重要方向<sup>[110]</sup>。关于食品辐照的法规与标准在不断建立并持续更新,并在 2016 年制定了《GB 18524—2016 食品安全国家标准食品辐照加工卫生规范》国家标准<sup>[111-112]</sup>。辐照处理标准化研究是辐照应用推广的重要环节,通用的处理标准可以极大地缩短贸易过程中辐照处理获得批准的速度<sup>[113]</sup>,规范化管理有助于辐照技术应用。

农产品对于辐照剂量有耐受的极限值,达到不同的处理效果所需要的辐照剂量有一定差异。对于耐受极限研究是辐照研究的重要方面,国际原子能机构根据相关研究构建了关于辐照耐受程度的数据库[ The International Database on

Commodity Tolerance (IDCT) ], 到 2019 年为止共计收录了 188 种商品的辐照处理耐受数据,且目前正在完善阶段。部分商品的耐受极限值可能低于辐照处理的要求值,为达到特定需求可以将 2 种或者几种处理方式结合起来,达到降低辐照剂量、减少对处理对象影响、缩短处理时间的目的。

### 参考文献

- [1] 陈志军, 戚文元, 吴富兰, 等. ESS-010-03 电子直线加速器的结构及其几种性能指标测试方法[J]. 核农学报, 2007, 21(1): 56-60.
- [2] PALOU L, DEL RIO M A, MARCILLA A, et al. Combined postharvest X-ray and cold quarantine treatments against the Mediterranean fruit fly in "Clemenles" mandarins [J]. Spanish journal of agricultural research, 2007, 5(4): 567-578.
- [3] KIM H W, KIM Y H B, HWANG K E, et al. Effects of gamma-ray, electron-beam, and X-ray irradiation on physicochemical properties of heat-induced gel prepared with salt-soluble pork protein[J]. Food science and biotechnology, 2017, 26(4): 955-958.
- [4] 王梁燕, 洪奇华, 孙志明, 等. 电子束辐照技术在生命科学中的应用[J]. 核农学报, 2018, 32(2): 283-290.
- [5] 朱佳廷, 冯敏, 高美须, 等. 高剂量辐照鸡胸肉安全性毒理学评价[J]. 核农学报, 2011, 25(6): 1191-1199.
- [6] AHN D U, KIM I S, LEE E J, et al. Irradiation and additive combinations

- on the pathogen reduction and quality of poultry meat[J]. Poultry science, 2013, 92(2): 534-545.
- [7] HALLMAN G J. Process control in phytosanitary irradiation of fresh fruits and vegetables as a model for other phytosanitary treatment processes[J]. Food control, 2017, 72: 372-377.
- [8] HALLMAN G J. Generic phytosanitary irradiation treatment for "true weevils" (Coleoptera; Curculionidae) infesting fresh commodities[J]. Florida entomologist, 2016, 99(2): 197-201.
- [9] BUSTOS-GRIFFIN E, HALLMAN G J, GRIFFIN R L. Phytosanitary irradiation in ports of entry: A practical solution for developing countries[J]. International journal of food science and technology, 2015, 50(1): 249-255.
- [10] HALLMAN G J. Phytosanitary applications of irradiation[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2011, 10(2): 143-151.
- [11] DUVENHAGE A J, JOHNSON S A. The potential of irradiation as a post-harvest disinfestation treatment against *Phlyctinus callosus* (Coleoptera; Curculionidae)[J]. Journal of economic entomology, 2014, 107(1): 154-160.
- [12] QU L J, WANG L J, WANG Q H, et al. Metabolic profiling of somatic tissues from *Monochamus alternatus* (Coleoptera; Cerambycidae) reveals effects of irradiation on metabolism[J]. International journal of molecular sciences, 2014, 15(6): 10806-10820.
- [13] MAHMOUD E A, GABARTY A. Impact of gamma radiation on male proboscis of *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier, 1790) (Coleoptera; Curculionidae)[J]. Journal of the entomological research society, 2017, 19(2): 53-65.
- [14] ARTHUR V, ARTHUR P B, MACHI A R. Pupation, adult emergence, and F-1 egg hatch after irradiation of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) last instars[J]. Florida entomologist, 2016, 99(2): 59-61.
- [15] 焦懿, 陈枝楠, 陈志焱.  $\gamma$ -射线对芒果实蝇的辐照处理[J]. 植物检疫, 2011, 25(5): 21-24.
- [16] OBRA G B, RESILVA S S, FOLLETT P A, et al. Large-scale confirmatory tests of a phytosanitary irradiation treatment against *sternochetus frigidus* (Coleoptera; Curculionidae) in Philippine mango[J]. Journal of economic entomology, 2014, 107(1): 161-173.
- [17] 杨红霞, 吴启松, 史松.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线辐照对南瓜实蝇的不育效果及对南瓜品质的影响[J]. 环境昆虫学报, 2018, 40(4): 815-819.
- [18] GOLDING J B, BLADES B L, SATYAN S, et al. Low dose gamma irradiation does not affect the quality, proximate or nutritional profile of 'Brigitta' blueberry and 'Maravilla' raspberry fruit[J]. Postharvest biology and technology, 2014, 96: 49-52.
- [19] KIM G C, RAKOVSKI C, CAPORASO F, et al. Low-dose irradiation can be used as a phytosanitary treatment for fresh table grapes[J]. Journal of food science, 2014, 79(1): 81-91.
- [20] FOLLETT P A, ARMSTRONG J W. Revised irradiation doses to control melon fly, Mediterranean fruit fly, and oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) and a generic dose for tephritid fruit flies[J]. Journal of economic entomology, 2004, 97(4): 1254-1262.
- [21] HALLMAN G J. Phytosanitary applications of irradiation[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2011, 10(2): 143-151.
- [22] HALLMAN G J. Generic phytosanitary irradiation treatments[J]. Radiation physics and chemistry, 2012, 81(7): 861-866.
- [23] 马丽珍, 南庆贤, 戴瑞彤. 不同气调包装方式对冷却猪肉在冷藏过程中的理化及感官特性的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 156-160.
- [24] 邱建辉, 陈玉霞, 谷峰, 等. 枸杞干辐照杀菌工艺剂量研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(18): 134-137.
- [25] 岳玲, 孔秋莲, 颜伟强, 等. 电子束辐照对冷鲜鸡肉的杀菌效果[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(12): 1319-1323.
- [26] JAVANMARD M, ROKNI N, BOKAIE S, et al. Effects of gamma irradiation and frozen storage on microbial, chemical and sensory quality of chicken meat in Iran[J]. Food control, 2006, 17(6): 469-473.
- [27] 王娟, 崔龙, 董威杰, 等. 电子束和 $\gamma$ 射线对油料氧化及霉菌的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 30-37.
- [28] 许佳, 肖欢, 焦新安, 等. 辐照技术对食源性病原菌的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(19): 5029-5033.
- [29] 郭豪宇, 赵玉华, 常学东. 辐照对峰甘板栗货架品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 262-267.
- [30] 赵维超, 胡南, 龙鼎新. 低剂量 $\gamma$ 射线辐照对斑马鱼胚胎的发育和遗传毒性效应[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(9): 1695-1703.
- [31] JO Y, SANYAL B, AMEER K, et al. Characterization of DNA comet and cellulose radical signal in Valencia oranges treated with different forms of ionizing radiation[J]. Postharvest biology and technology, 2018, 135: 68-76.
- [32] 许建, 贾凯, 何梅, 等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线处理对大蒜辐照效应的影响[J]. 分子植物育种, 2018, 16(7): 2329-2334.
- [33] 田竹希, 龙明秀, 李咏富, 等. 短波紫外线照射和 $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 辐照处理对大樱桃贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(6): 1-13.
- [34] 王守经, 胡鹏, 汝医, 等.  $\gamma$ 射线辐照处理对扒鸡部分品质指标的影响[J]. 山东农业科学, 2011(10): 87-89.
- [35] 王秋芳, 乔勇进, 陈召亮, 等. 高能电子束辐照对花椰菜保鲜效果的研究[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(1): 133-136.
- [36] 周慧娟, 叶正文, 张学英, 等. 电子束辐照对蓝莓品质及生理代谢的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(9): 1308-1316.
- [37] CHEN W, MENG X J. Effect of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation on storage quality and cell wall ultra-structure of blueberry fruit during cold storage[J]. Innovative food science & emerging technologies, 2016, 38: 91-97.
- [38] 王家星, 王杰, 王志新, 等.  $^{60}\text{Co}$ 射线辐照对马蹄笋贮藏期品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2018, 54(4): 17-20.
- [39] 徐广洲, 何苗. 盐城市售蔬菜农药残留状况调查和风险评估[J]. 科技创新导报, 2017, 14(36): 114-116.
- [40] 曹宁阳. 吉林省部分地区水果蔬菜农药残留调查分析[J]. 农业科技与装备, 2018(2): 60-61.
- [41] 宫春波, 董峰光, 邢玉芳, 等. 烟台市售水果中 18 种杀菌剂类农药残留状况调查[J]. 现代预防医学, 2019, 46(2): 242-246.
- [42] 王秋芳, 陈召亮, 乔勇进, 等. 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.
- [43] 张海伟, 冯慧, 费晨, 等.  $\gamma$ 射线辐照降解绿茶中的农残联苯菊酯[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2013, 31(5): 1-6.
- [44] 姚思敏, 陈诗晴, 周冠炜, 等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线对草莓贮藏过程中色香味形的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 254-259.
- [45] LEE J W, YOON H S, LEE K H, et al. Conformational changes of myosin by gamma irradiation[J]. Radiation physics and chemistry, 2000, 58(3): 271-277.
- [46] 戴妍, 韩兆鹏, 范蓓, 等. 辐照杀菌全蛋液贮藏期间抗氧化物活性及过敏源特性变化分析[J]. 农产品加工, 2016(1): 1-5.
- [47] 李颖琦, 王克超, 王亚丽. 水产品过敏原及其消减方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(4): 1033-1038.
- [48] 官爱艳, 罗华彬, 梅卡琳, 等. 电子束辐照对中华管鞭虾原肌球蛋白免疫原性及其构象的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 116-121.
- [49] LEE J W, KIM J H, LANG K, et al. Effects of gamma radiation on the allergenic and antigenic properties of milk proteins[J]. Journal of food protection, 2001, 64(2): 272-276.
- [50] 王玮, 朱旭东, 梁丽娟.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 辐照对猪血清白蛋白免疫原性及构象的影响[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(3): 542-546.
- [51] 许舒婷, 高美须, 支玉香, 等. 电子束辐照对花生过敏原免疫原性及生化性质影响的研究[J]. 核农学报, 2012, 26(7): 1006-1011.
- [52] CREVEL R, BRIGGS D, HEFLE S L, et al. Hazard characterisation in food allergen risk assessment: The application of statistical approaches and the use of clinical data[J]. Food and chemical toxicology, 2007, 45(5): 691-701.
- [53] 张洋, 付兴明, 肖扬, 等. 电子束辐照降解水体中磺胺间甲氧嘧啶[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2520-2526.
- [54] 吴庆, 孔秋莲, 戚文元, 等.  $\gamma$ 射线和电子束辐照对意式风干火腿色泽和脂质氧化的影响[J]. 上海农业学报, 2013, 29(2): 38-42.
- [55] 尚颀斌, 高美须, 李淑荣, 等. 电子束辐照对冷鲜猪肉品质的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(4): 437-442.
- [56] 李玮轩.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 辐照处理对不同品种蓝莓货架期及冷藏效果的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [57] 周任佳, 乔勇进, 王海宏, 等. 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.
- [58] 王琛.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照处理对蓝莓保鲜效应及其细胞壁降解机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [59] 胡碧君, 尹寿伟, 资名扬, 等. 电子束辐照对小麦分离淀粉流变学特性的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 74-76.
- [60] 张春芳, 杨文鸽, 徐大伦, 等. 电子束辐照对美国红鱼肉营养成分的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2011, 29(4): 219-225.
- [61] 贾倩, 李淑荣, 高美须, 等. 电子束和 $\gamma$ 射线辐照对素鸡杀菌效果及氧化效应的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(13): 61-65.
- [62] 王娟, 崔龙, 董威杰, 等. 电子束和 $\gamma$ 射线对油料氧化及霉菌的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 30-37.
- [63] 杨俊丽, 乔勇进, 王海宏, 等. 高能电子束与 $^{60}\text{Co}$ 射线对大蒜辐照保鲜效果的比较研究[J]. 食品科学, 2010, 31(12): 260-265.

- [64] 陈曦,李国林,陈梦玉,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  动态辐照对“园蓝”蓝莓品质的影响[J]. 食品研究与开发,2016,37(24):171-175.
- [65] 陶焯,王琛,高雅,等. 不同剂量<sup>60</sup>Co $\gamma$  辐照对蓝莓果实贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2017,8(7):2779-2786.
- [66] 康芬芬,彭扬思,高健会,等.  $\gamma$  射线辐照处理对香蕉品质的影响[J]. 植物检疫,2010,24(4):35-38.
- [67] 马艳萍,马惠玲,刘兴华,等.<sup>60</sup>Co $\gamma$  射线辐照对鲜食核桃采后膜脂过氧化作用的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(12):171-176.
- [68] 邹立强,周磊,刘伟,等. 辐照处理对脐橙汁杀菌效果及理化性质的影响[J]. 食品与机械,2014,30(5):180-183.
- [69] 赵军轻. 电子束处理对小麦储藏性能及加工品质的影响[D]. 无锡:江南大学,2017.
- [70] 郭东权,王争艳,鲁玉杰,等. 电子束辐照防治扁甲科害虫及对小麦品质影响[J]. 中国粮油学报,2016,31(2):98-102.
- [71] 胡碧君,温其标. 电子束辐照对小麦粉加工特性及馒头食用品质影响的研究[J]. 粮食与饲料工业,2010(2):6-9.
- [72] 王欢. 电子束辐照大米食用安全性评价[D]. 长春:吉林农业大学,2017.
- [73] 杨丹,罗小虎,齐丽君,等. 电子束辐照对稻米储藏特性及品质的影响[J]. 食品与机械,2017,33(2):106-110.
- [74] 陈银基,陈霞,蒋伟鑫,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐照处理对低温储藏糙米品质及微结构的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(11):2214-2223.
- [75] 陈霞.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐照处理对低温储藏糙米品质的影响[D]. 南京:南京财经大学,2015.
- [76] 郑秀艳,孟繁博,林茂,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐照对花生杀菌效果及其品质的影响[J]. 现代食品科技,2018,34(1):91-96.
- [77] 黄文娟,张进杰,李晓晖,等. 电子束辐照对真空包装章鱼生物胺的抑制作用研究[J]. 核农学报,2017,31(9):1737-1745.
- [78] 王晶晶,张成金,汪海燕,等. 电子束和 $\gamma$  射线辐照对象拔蚌品质影响的异性研究[J]. 核农学报,2017,31(1):73-79.
- [79] 翟建青,韩燕,肖欢,等. 电子束辐照对冷鲜鸡相关品质的影响研究[J]. 食品工业科技,2018,39(7):280-285.
- [80] 赖宏刚,蒋云升,张元,等. 辐照处理对冷鲜鸡肉的品质的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):206-211.
- [81] 程志霞,王宁,王晓拓,等. 电子束和 $\gamma$  射线辐照对冷鲜猪肉保鲜效果的研究[J]. 核农学报,2016,30(5):897-903.
- [82] 程志霞,刘伟,冯晓琳,等. 电子束辐照对冷鲜猪肉品质及蛋白特性的影响[J]. 食品与发酵工业,2017,43(3):151-156.
- [83] 刘春泉,冯敏,李澧,等. 辐照处理对冷冻羊肉品质的影响[J]. 核农学报,2014,28(6):1018-1023.
- [84] 于海,曹宏,李想,等. 辐照对发酵香肠品质特性的影响[J]. 核农学报,2010,24(6):1214-1218.
- [85] 贾倩,李淑荣,高美须,等. 电子束辐照对素鸡杀菌效果及品质特性影响的研究[J]. 核农学报,2012,26(2):295-299.
- [86] 沈月,刘超超,高美须,等. 辐照对鲜切彩椒品质的影响[J]. 现代食品科技,2014,30(8):212-218.
- [87] 陈谦,傅舒,杨敏,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐照对美味牛肝菌挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技,2018,39(21):212-217.
- [88] 斯琴图雅,王强,张玉宝,等. 电子束辐照对香菇保鲜效果的影响[J]. 安徽农业科学,2018,46(27):166-168.
- [89] 顾可飞,刘海燕,杨海峰,等. 电子束辐照对羊肚菌营养成分影响分析[J]. 食品工业科技,2018,39(12):55-62.
- [90] 张娟琴,邢增涛,白冰,等. 电子束辐照对双孢菇采后品质的影响[J]. 核农学报,2011,25(1):88-92.
- [91] 张晗,吕鸣春,梅卡琳,等. 电子束辐照对鲈鱼肉杀菌保鲜效果及品质的影响[J]. 食品科学,2018,39(21):66-71.
- [92] 钼晓艳,李海蓝,张金木,等. 不同剂量电子束辐照对鲈鱼半成品灭菌及品质的影响[J]. 保鲜与加工,2018,18(5):49-54.
- [93] 张立敏. 电子束辐照技术对鱼类过敏原活性及质构的影响[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
- [94] 李飞,陈绍军,陈玲,等. 辐照对烤鳗制品品质影响[J]. 食品科学技术学报,2013,31(5):43-49.
- [95] 许建,贾凯,何梅,等.<sup>60</sup>Co $\gamma$  射线处理对大蒜辐照效应的影响[J]. 分子植物育种,2018,16(7):2329-2334.
- [96] 陈召亮,方强,王海宏,等. 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.
- [97] 张莉会,蔡芳,何建军,等. 辐照对榨菜品质及其贮存效果的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2017,35(5):53-59.
- [98] 吴海虹,宋江峰,李大婧,等. 辐照杀菌对紫薯全粉主要营养成分的影响[J]. 江苏农业学报,2011,27(4):918-920.
- [99] 程江华,张继刚,杨松,等.<sup>60</sup>Co $\gamma$  射线处理对山核桃贮藏品质及稳定性的影响[J]. 中国油脂,2017,42(9):88-93.
- [100] 董慧,鲁周民,马艳萍,等. 辐照对核桃果壳冷藏生理与品质的影响[J]. 食品科学,2016,37(20):228-233.
- [101] 涂晓翼,武小芬,陈亮,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐照处理对安化红茶品质的影响[J]. 湖南农业科学,2014(6):58-60.
- [102] 罗志平,孟兰贞,徐远芳,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐照对茶花蜂花粉的杀菌效果及品质影响[J]. 食品与机械,2015,31(3):150-153.
- [103] 陈雪,高美须,崔承弼,等. 电子加速器辐照对弱酸性防腐抑菌性的影响[J]. 中国食品学报,2018,18(9):210-216.
- [104] 伍玲,何江,黄敏,等. 辐照对四川泡生姜的影响[J]. 中国酿造,2014,33(10):72-75.
- [105] 李燕杰,黄佳佳,东方,等. 电子束辐照对三种香辛料的杀菌效果及香气成分的影响[J]. 食品工业科技,2017,38(16):19-23.
- [106] 董丹,刘会平,徐涛,等. 辐照对花椒粉中微生物及抗氧化性的影响[J]. 中国调味品,2013,38(6):35-40.
- [107] 刘颖,魏敏,杨平华,等.<sup>60</sup>Co- $\gamma$  射线辐照对白酒的影响[J]. 食品研究与开发,2016,37(15):37-39.
- [108] 张苗苗,陆栋,曹国珍,等. 电子束辐照对白酒香气组分影响的研究[J]. 食品工业科技,2013,34(21):103-106.
- [109] 詹国平,高美须. 辐照技术在检疫处理中的应用与发展[J]. 植物检疫,2013,27(6):1-12.
- [110] 邓文敏,陈浩,裴颖,等. 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.
- [111] 黄颀,于晓松,包大跃,等. 食品辐照国内外法规标准现状分析及对策研究[J]. 中国公共卫生,2006(7):891-893.
- [112] 姜晓燕,王晓英,郭云昌,等. 我国辐照食品卫生法规和标准修订现状[J]. 标准科学,2013(10):58-61.
- [113] FOLLETT P A. Generic radiation quarantine treatments: The next steps [J]. Journal of economic entomology, 2009, 102(4):1399-1406.

(上接第13页)

- [33] 梁太波,张景玲,田雷,等. 干旱胁迫下外源甜菜碱和脯氨酸对烤烟抗氧化代谢的影响[J]. 烟草科技,2013(2):68-71.
- [34] 张永涛. 甜菜碱提高烟草耐热性研究[D]. 泰安:山东农业大学,2013.
- [35] CHINUSAMY V, ZHU J H, ZHU J K. Cold stress regulation of gene expression in plants[J]. Trends Plant Sci, 2007, 12:444-451.
- [36] KNIGHT M R, KNIGHT H. Low-temperature perception leading to gene expression and cold tolerance in higher plants[J]. New Phytol, 2012, 195:737-751.
- [37] SHINOZAKI K, YAMAGUCHI-SHINOZAKI K, SEKI M. Regulatory network of gene expression in the drought and cold stress responses[J]. Curr Opin Plant Biol, 2003, 6:410-417.
- [38] HOLMSTRÖM K O, SOMERSALO S, MANDAL A, et al. Improved tolerance to salinity and low temperature in transgenic tobacco producing glycine betaine[J]. J Exp Bot, 2000, 51(343):177-185.
- [39] 谢会雅,史端甫,张红兵,等. 生理活性物质对遭遇低温逆境烟草抗性生理指标的影响[J]. 湖南农业科学, 2014(23):18-21.
- [40] 王宏伟. 转甜菜碱醇脱氢酶基因烟草对低温胁迫的响应[D]. 泰安:山东农业大学,2010.
- [41] BAJJI M, LUTTS S, KINET J M. Water deficit effect on solution contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum* Desf) cultivars performing differently in arid conditions[J]. Plant Sci, 2001, 160:669-681.
- [42] PENCE N S, LARSEN P B, EBBS S D, et al. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2000, 97:4956-4960.
- [43] 封鹏雯. 甜菜碱提高烟草辐射抗性机理的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
- [44] ISLAM M M, HOQUE M A, OKUMA E, et al. Exogenous proline and glycinebetaine increase antioxidant enzyme activities and confer tolerance to cadmium stress in cultured tobacco cells[J]. J Plant Physiol, 2009, 15;166(15):1587-1597.
- [45] 李楠,赵琦,黄静,赵玉锦,等. 六棱大麦 HVA1 基因在烟草中遗传转化的研究[J]. 生物技术通报,2007(3):139-144.
- [46] ZHOU S F, CHEN X Y, ZHANG X G, et al. Improved salt tolerance in tobacco plants by co-transformation of a betaine synthesis gene *BADH* and a vacuolar Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiporter gene *SeNHX1* [J]. Biotechnol Lett, 2008, 30:369-376.