

辐射处理对水果品质影响的研究进展

杨宗渠^{1,2}, 李长看^{1,2,3}, 雷志华¹, 李玉华¹, 罗青¹, 范春丽¹, 刘宇邈¹

(1. 郑州师范学院生命科学院, 河南 郑州 450044; 2. 郑州师范学院生物物种资源研究中心, 河南 郑州 450044;
3. 郑州市生物物种资源研究重点实验室, 河南 郑州 450044)

摘要: 为给水果辐射保鲜的研究与应用提供参考, 本文综述了辐照技术对水果生理代谢、感官品质、营养成分及加工品质的影响。提出应加强电子束对水果保鲜机理及辐照工艺、辐射降解果品中农药残留的机理和工艺研究, 探讨辐照技术降低水果致敏性的可行性。应根据不同种类水果的生理特点和贮藏特性, 将辐射保鲜与其他保鲜技术有机结合起来, 以降低辐照成本、提高保鲜效果。

关键词: 辐照; 感官品质; 营养成分; 加工品质; 水果

A Review of the Effect of Irradiation Treatment on Fruit Quality

YANG Zongqu^{1,2}, LI Changkan^{1,2,3}, LEI Zhihua¹, LI Yuhua¹, LUO Qing¹, FAN Chunli¹, LIU Yumiao¹

(1. School of Life Sciences, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China;
2. Research Center for Organisms Species Resources, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China;
3. Key Laboratory of Organisms Species Resources of Zhengzhou, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: In order to provide reference for future studies and applications of irradiation in the preservation of fruits, the effect of irradiation on physiological metabolism, sensory quality, nutritional components and processing quality of fruits is reviewed. Meanwhile, the mechanism of electron beam technology for fruit preservation, the mechanism and process conditions for the degradation of pesticide residues in fruits by irradiation, and the feasibility of using irradiation to reduce fruit allergenicity are discussed. According to the physiological characteristics and storage characteristics of different types of fruits, irradiation treatment in combination with other preservation technologies can reduce the cost and improve the preservation efficiency of fruits.

Key words: irradiation; sensory characteristics; nutrients; processing quality; fruit

中图分类号: S609.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)23-0353-05

doi:10.7506/spkx1002-6630-201523063

我国是水果生产大国, 2012年水果产量达到2.4亿多吨。随着经济发展和生活水平的提高, 消费者对水果质量的要求越来越高。由于保鲜技术落后, 我国水果在贮运销售期间的损失率在20%以上, 严重影响果品在国内外市场的竞争力^[1]。目前在贮藏中应用的冷藏和气调保鲜, 虽然取得了良好的保鲜效果, 但存在设备投资大、耗能多、运营成本高等问题。常用的化学保鲜由于不能很好地保持原有风味, 存在化学成分残留的隐患, 影响果品安全质量, 不符合绿色、环保的要求。安全、高效、低能耗的保鲜技术对于提高水果的商品质量, 提高产品附加值具有十分重要的意义。利用 γ 射线、电子束等电离辐射对生物分子的直接作用和间接作用, 抑制水果的呼吸作用、延缓果实衰老、杀虫灭菌的研究引起国内外学者的广泛关注, 围绕辐射处理对水果的物理效应、化学

效应和生物效应的研究不断深入^[2]。但与蔬菜的辐射保鲜相比, 水果辐射保鲜的基础和应用研究较为薄弱, 该项技术的商业化应用进展缓慢。本文根据相关文献, 结合笔者的研究工作, 分析该领域的研究现状及存在问题, 以为水果辐射保鲜的研究与应用提供参考。

1 辐射处理对水果生理代谢的影响

果实经射线照射后, 生理代谢活动受到抑制。对于跃变型果实而言, 表现为后熟被抑制、呼吸跃变推迟。青蕉苹果用400 Gy ^{60}Co γ 射线处理后第6天呼吸跃变期峰值的呼吸强度仅为未辐照果实的68.8%^[2-3]。呼吸强度的降低是由于辐照减少了乙烯产生, 推迟了高峰出现的时间。苹果果实乙烯的释放速率与组织1-氨基环丙烷-1-羧

收稿日期: 2015-04-18

基金项目: 河南省科技攻关项目(0324010007); 郑州市科技攻关项目(112PPTGY250-4)

作者简介: 杨宗渠(1964—), 男, 教授, 博士, 主要从事食品保鲜与加工研究。E-mail: yangzqu@163.com

酸(1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)含量和乙烯形成酶(ethylene forming enzyme, EFE)活性有关, ACC转化为乙烯需要EFE的催化。 γ 射线对EFE有明显的抑制效果, 在100~1 000 Gy剂量范围内, 整个高峰乙烯的产生量都低于未辐照果实, 抑制作用随辐照剂量的增加而增强, 1 000 Gy剂量处理几乎不出现峰值。进一步的研究显示, 植物细胞的质膜调节细胞内外物质的交流, 细胞膜透性的变化反映果实衰老的情况。对苹果果肉细胞亚细胞结构的观察发现, γ 射线辐照促使细胞壁纤维素分解与壁解体, 对细胞的膜系统有很大的影响。辐照促使淀粉粒包膜分解消失, 原生质膜松弛, 线粒体内膜构成的嵴变模糊至消失, 细胞膜结构完整性受到破坏。 γ 射线对EFE活性的抑制效果, 可能就是 γ 射线对膜完整性作用的结果, 从而降低了乙烯的生成速率^[4]。关学雨等^[5]研究认为, 莱阳梨经500~2 000 Gy γ 射线辐照后, 乙烯生成量逐渐下降, 下降幅度随着剂量的增高而增大, 未辐照的果实乙烯生成稳定。说明辐照处理可抑制莱阳梨乙烯生成, 延缓后熟过程。辐射处理同样可以抑制桃^[6]、葡萄^[7]和荔枝^[8]果实的呼吸作用, 延缓成熟。非跃变型果实如柑橘类辐照后, 未观察到延缓后熟的作用, 如绿色柠檬和早熟蜜橘辐照后黄化加速, 成熟加快^[9]。王秋芳等^[10]报道, 用400~1 000 Gy的电子束辐照巨峰葡萄后低温贮藏, 能维持较高的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(oxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性, 抑制膜脂过氧化进程。童莉等^[11]认为, 新疆库尔勒香梨中的蔗糖转化酶在细胞中集聚, 加快果实的后熟。5~11 kGy γ 射线处理后, 香梨果实中蔗糖转化酶的活性始终低于未辐照的果实, 对于延迟果实的衰老是有利的。马艳萍等^[12]以辽河4号鲜食核桃为材料, 采用不同剂量的⁶⁰Co γ 射线照射, 发现100、1 000 Gy剂量辐照提高了胚芽中的脱落酸(abscisic acid, ABA)含量, 降低了赤霉素(gibberellic acid, GA₃)、吲哚乙酸(indoleacetic acid, IAA)、玉米素核苷(zeatin riboside, ZR)含量及三者与ABA的比值, 0.5 kGy处理后, 果实冷藏期间的超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性提高、丙二醛(malondialdehyde, MDA)积累减少, 过氧化物酶、脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)活性降低。杨文斌等^[13]对新疆库尔勒香梨的研究表明, 经700、1 400 Gy剂量辐照处理的果实在贮藏期间, 甲醇、乙醇、乙醛、乙酸乙酯4种非乙烯挥发性成分产生量与对照无明显差异, 2 800 Gy的高剂量辐照使甲醇、乙醇、乙醛在短期内急剧增加, 证明低剂量的辐照处理对香梨具有有利的生理调节作用, 能延缓香梨的衰老进程。

2 辐射处理对水果感官品质的影响

2.1 色泽及硬度

硬度是衡量水果贮藏品质的重要指标。青蕉苹果经400 Gy剂量 γ 射线辐照后, 在0~2 °C条件下贮藏6个月, 硬度仍保持在12.7 Lb/cm², 未辐照的果实硬度只有8.4 Lb/cm²^[4]。可见, 选用适宜剂量的 γ 射线辐照苹果, 造成果肉细胞膜系统一定程度的损伤, 降低生理代谢强度, 增加细胞壁与细胞膜系统的钙含量, 可以提高果实硬度。陆秋君等^[14]报道大珍宝赤月桃以1.0 kGy剂量的 γ 射线辐照后, 果实的硬度降低, 0.3 kGy剂量的辐照处理对果实硬度无显著影响。傅俊杰等^[15]发现中华猕猴桃果实以0.3~1.5 kGy γ 射线处理后, 硬度比未辐照明显下降。硬度的下降与果实中的淀粉有关, 由于果肉中的淀粉是以淀粉粒的形式存在, 维持细胞膨压, 对细胞起支撑作用, 淀粉受到 γ 射线照射后, 一部分淀粉被降解, 其对果肉的支撑作用随之减弱, 导致组织变软。

徐赞等^[16]研究了以电子束辐照泰国青芒果、澳大利亚红芒果和台湾二林种杨桃对果实表皮色泽的影响, 证实3种水果经0.43~1.68 kGy电子束辐照后可导致果实产生色差, 0.43 kGy剂量处理色差最小, 1.68 kGy处理最大。室温下存放7 d后, 不同辐照剂量的果皮色泽差异明显, 果皮出现褐变, 且剂量越大, 褐变越严重, 但泰国青芒果的后熟黄化受到抑制。康芬芬等^[17]报道, 菲律宾出产的绿熟期香蕉经600 Gy剂量 γ 射线辐照之后10 d, 果皮出现轻度生理损伤, 200、400 Gy剂量辐照可以保持香蕉外观品质, 且400 Gy剂量处理的果皮褐色斑点较200 Gy剂量处理少。柑桔果实以1 kGy以上的 γ 射线辐照时, 果皮变成棕色^[18]。陈志军等^[19]对无核红提葡萄的研究表明, 0.56~2.1 kGy的电子束辐照后, 葡萄果皮花青素含量下降, 剂量越高下降幅度越大, 2.1 kGy剂量辐照果皮花青素含量显著低于未辐照处理。金宇东等^[20]的研究认为, 用高于1 kGy剂量的 γ 射线辐照无锡产水蜜桃, 果肉很快会发生褐变, 并且辐照剂量越高, 果实褐变越严重。褐变原因在于高剂量辐照处理后, 果实细胞膜脂发生相变, 细胞膜透性增大, 使得细胞中的酚类物质在氧化酶的催化下发生氧化反应产生褐色的醌类物质, 从而引起褐变发生。

2.2 腐烂率

微生物引起的侵染性病害是水果贮藏期间腐烂的主要原因之一, 辐射处理可以杀死致病微生物, 因而可降低果实腐烂率。赵菊鹏等^[21]研究指出, 莲雾200~600 Gy γ 射线辐照处理7 d后, 果实的腐烂程度明显低于未辐照。雷庆等^[22]证明以1~3 kGy的电子束辐照草莓, 能减少果实上的微生物数量, 减轻草莓腐烂, 其中2、3 kGy处理能延长草莓保质期2~3 d。王秋芳等^[23]报道

0.56~2.10 kGy电子束处理可减少葡萄果实上的微生物数量,且剂量越高,微生物数量越少,腐烂率越低。周慧娟等^[24]用1~1.5 kGy的电子束辐照“艾利奥特”蓝莓果实,可显著降低蓝莓腐烂率,冷藏至第60天,好果率仍在90%以上,保鲜期由30 d延长至60 d。

2.3 风味

庞杰^[25]用0.1~0.9 kGy ^{60}Co γ 射线辐照梁山柚,可降低梁山柚苦味物质二氢黄酮类化合物柚苷的含量,抑制乙醇含量提高,所试剂量中以0.5 kGy辐射处理的脱苦效果最好,对果实品质无其他不良影响。陆秋君等^[14]报道,0.3 kGy和1 kGy剂量的 γ 射线辐照处理大珍宝赤月桃,果实在贮藏初期糖酸比都下降,在后期0.3 kGy剂量使糖酸比下降速度减慢,1.0 kGy剂量下降速度较快,说明低剂量更能保持果实的风味。用0.15~0.2 kGy的 γ 射线辐照涩柿,可以脱去涩味^[2]。

3 辐射处理对水果营养成分、加工品质及安全性的影响

3.1 对水果营养成分的影响

根据辐射生物学原理的靶理论, γ 射线、电子束等处理水果,射线可直接作用于果实中的营养成分,果实中的水分子吸收射线能量后产生的离子对和自由基间接作用于各种营养成分,使水果中的营养成分发生变化。

康芬芬等^[26]以红富士苹果为实验材料,20~1 000 Gy的 γ 射线照射后,测定微量元素含量,结果表明辐照苹果中Mg、K、Ca、Fe、Cu、Cr、Mn含量与未辐照的果实无显著差异,但辐照后12 d,辐射处理与未辐照的果实的Zn含量差异显著,随辐照剂量的增加,Zn元素含量呈现递减的趋势。200 Gy~1 kGy的 γ 射线照射香蕉,Mg、Ca和Zn含量与未辐照果实无显著性差异, K^+ 和 Fe^{3+} 含量均略低于未辐照果实^[4]。

大量的研究报道显示,水果中的碳水化合物对辐照表现非常稳定,20~50 kGy范围内的剂量不会使糖类的分子结构发生变化。赵菊鹏等^[27]报道,番石榴果实用218 Gy以下剂量照射,受照果实的还原糖、蔗糖、总糖、可滴定酸、可溶性固形物等主要营养成分与未辐照果实无明显差异。有报道指出,200~600 Gy的 γ 射线辐照莲雾和番木瓜果实,辐照莲雾的糖度高于未辐照果实,有机酸、可溶性固形物含量与未辐照无明显差异,辐照番木瓜还原糖、蔗糖、总糖、有机酸及可溶性固形物均与未辐照果实无明显差异。辐照莲雾的含糖量增加,使糖酸比提高,因此辐照莲雾果实品尝其风味均优于未辐照^[21]。童莉等^[11]对库尔勒香梨的研究表明,由于果实经 γ 射线处理后,延迟了呼吸高峰出现,呼吸作用减弱,减缓了对糖分的消耗。贮藏期间,1、5 kGy剂量辐照的香梨总糖含量均显著高于未辐照果实。威蓉迪等^[28]

研究发现,用250 Gy剂量的 γ 射线辐照美国产甜樱桃,在25 °C条件下存放5 d后,还原糖和可滴定酸均高于未辐照果实。吴庆等^[29]以400~1 600 Gy的电子束辐照芒果和阳桃,果实的还原糖、可滴定酸含量与未辐照均无显著差异。另有报道指出,在1.5~3 kGy γ 射线照射草莓时,总糖浓度和主要的糖类如D-果糖、D-葡萄糖以及D-蔗糖的浓度都没有变化,酸度和挥发性成分含量均无变化^[30-31]。傅俊杰等^[15]研究得知,300~900 Gy的 γ 射线辐照中华猕猴桃,20 °C条件下存放20 d后,对可溶性固形物、总糖和总酸含量无明显影响。3 kGy以下剂量 γ 射线照射洋李,糖类和酸类的成分没有显著变化^[2]。葡萄和桃的辐照剂量在2 kGy以下时,受照果实的总糖和还原糖含量没有变化,但是在更高的剂量时,总糖和还原糖的浓度下降而酸度增加^[6-7,10,14]。对海枣、菠萝、枣、无花果、龙眼和红毛丹、番木瓜来说,1 kGy剂量的 γ 射线不会改变总糖和还原糖的浓度^[2,21]。

γ 射线照射对水果中VC含量的影响已有较多报道,这些研究大部分是在剂量低于2 kGy时进行的,VC的含量损失在30%以下^[3]。经300 Gy γ 射线辐照的苹果中VC较为稳定,这是因为苹果中的糖类和有机酸对VC起到了保护作用^[32]。傅俊杰等^[15]以0.3~1.5 kGy γ 射线处理中华猕猴桃,在20 d的贮藏期内,VC含量随辐照剂量增大而下降。蓝莓^[24]、荔枝^[33]、莲雾^[21]、梨^[11]、桃^[6]、草莓^[22,31]、葡萄^[10]、番木瓜^[21]、柑橘^[9]、杨桃^[29]果实辐照后,VC含量均出现不同程度的降低,辐照剂量越大,VC含量降低的幅度越大。

3.2 对水果加工品质的影响

果实经一定剂量辐照后导致其组织结构变化和不同程度损伤,表现为细胞膜膨大、断裂,细胞质聚集,形成颗粒,核膜膨大,核质聚集、不均匀,形成颗粒^[4],液泡膜受到破坏,液泡内液体流出,液泡变小,并吸附在胞膜周围,细胞出现质壁分离,使细胞组织的透性增强,水分迁移能力大大增强,干燥时失水速率加快^[32]。这些变化可引起干燥特性的变化,最终影响干燥速度和干制品品质。王俊等^[34]用2~6 kGy的 γ 射线辐照切片苹果并进行热风干燥处理,发现辐照苹果在相同时间内水分散失量比未辐照增多,表现为失水速率加快。未辐照苹果的失水过程有升速和降速两个阶段,经辐照处理后的失水过程只有一个降速阶段。在相同时间内,经一定辐照剂量处理后苹果片升温快、温度高,苹果片温度升高量随辐照剂量升高而增大。6 kGy剂量以下辐照处理后,干燥后苹果片感官质量比未辐照略有提高。剂量超过6 kGy,苹果片干制品外观质量下降。毕金峰等^[35]研究发现,2~5 kGy的 γ 射线辐照国光、富士、红香蕉和黄香蕉4个苹果品种,可以软化苹果组织、提高预干燥速率,对提高膨

化产品脆度有作用,在一定程度上降低了膨化产品硬度,但辐照产品膨化后褐变严重。

3.3 对水果安全性的影响

水果的辐照处理是一种物理加工过程,不使用化学药剂,辐照水果中没有药剂残留。钴源、铯源为密封的辐射源,不会散落出放射性物质,辐照过程中放射源并不与食品直接接触,因此食品不可能被放射性污染而产生残留。组成食品的主要元素为碳、氢、氧、氮和一些微量元素,使这些元素辐照后产生放射性,需要超过10 MeV的能量,而 ^{60}Co γ 射线平均能量为1.25 MeV, ^{137}Cs γ 射线的能量仅为0.66 MeV,加速器电子束能量也不大于10 MeV,不会引发感生放射性。1980年,联合国粮农组织、国际原子能机构和世界卫生组织联合专家委员会根据长期的毒理学实验结果宣布,总平均剂量不超过10 kGy辐照的任何食品是安全的,不存在毒理学上的危害,不需要对经过该剂量辐照处理的食品再作毒理实验。1983年,国际食品法典委员会正式颁布《国际辐照食品通用标准》和《用于处理食品的辐照装置运行实用准则》以及有关的剂量学及其他附件,相当于给这项技术颁发了绿色通行证^[2]。我国卫生部1997年颁布了辐照水果的国家标准:GB 14891.5—1997《辐照新鲜水果、蔬菜类的卫生标准》,为辐照技术在水果保鲜中应用开辟了广阔的前景。

4 结 语

目前用于水果辐照处理的射线主要是 ^{60}Co γ 射线,电子束辐照水果的基础研究和辐照工艺研究都比较薄弱^[36]。不同种类的射线辐照同一种水果会产生不同的生物化学效应,莲雾果实用400 Gy剂量的 γ 射线处理后,VC含量显著下降,但用相同剂量的电子束辐照后,VC含量与未辐照无显著差异。为充分发挥电子束辐照操控方便、安全性高、剂量不均匀度低的优势,应加强电子束对水果保鲜机理及辐照工艺的研究。

果实中的农药残留是影响水果食用安全性和国际贸易的重要因素之一,射线辐照形成的自由基和离子使农药残留物的分子结构发生改变,从而降低或去除果实中的农药残留,辐射处理降解水产品、茶叶及肉制品的农药残留已经取得重要进展,但利用辐照技术降解水果中农药残留的机理和工艺还需进行深入探索。

水果可引发特殊人群的过敏反应,原因是患者的免疫系统对水果中的特定蛋白成分产生过激反应而导致病理损伤^[37]。现有的研究发现,辐射处理后过敏原肽链发生断裂、交联等反应,抗原决定簇发生改变,致敏性降低,有可能成为脱敏的主要技术^[38-39]。辐射处理应用于水果脱敏,不仅可以拓宽该项技术的应用范围,还对于提

高水果安全性具有重要意义,但辐照技术降低水果致敏性的可行性及工艺都需要进行深入的研究。

水果保鲜中现有的冷藏、气调保鲜、化学保鲜和生物技术保鲜都具有抑制呼吸代谢、延缓衰老和抑制采后病原菌等作用^[40-41],这些技术各具特点,也都有局限性。根据不同种类水果的生理特点和贮藏特性,将辐照保鲜与其他保鲜技术配合使用,可发挥不同保鲜技术之间的协同作用,降低辐照剂量,降低辐照成本,提高保鲜效果,促进水果辐照保鲜技术的商业化应用。

综上所述,辐照技术用于水果保鲜,有其独特的优势。利用射线对物质作用的物理效应、化学效应和生物学效应,可有效抑制果实的生理代谢活动,杀灭引起腐烂的微生物,更好地保持水果的感官品质、营养成分和加工品质。辐射处理过程能耗低,无射线残留和感生放射性,不存在化学残留和环境污染问题。与冷藏、化学保鲜等传统技术相比,辐照技术具有节约能源、方便高效、能很好地保持原有风味和卫生安全性高的特点。水果辐射保鲜由于其技术可行性、卫生安全性、立法与标准的科学性、经济可行性,将在提高我国水果保鲜技术水平中发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 中国果品流通协会. 2013中国果品产业发展报告[DB/OL]. (2014-01-24)[2015-02-01]. http://www.china-fruit.com.cn/Detail_1520953_101102.shtml.
- [2] 杨宗渠. 辐射生物学原理及其应用[M]. 郑州: 河南人民出版社, 2009: 216-325.
- [3] FAN Ximei, ARGENTA L, MATTHEIS J. Impacts of ionizing radiation on volatile production by ripening gala apple fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(1): 254-262.
- [4] FATHOLLAHI H, MOSTAFAVI H, MIRMAJLESSI S. Integrated effect of gamma radiation and biocontrol agent on quality parameters of apple fruit: an innovative commercial preservation method[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 91: 193-199.
- [5] 关学雨, 孙守义, 王守经. 辐照莱阳梨贮藏期生理生化指标的研究[J]. 核农学报, 1993, 14(3): 120-123.
- [6] MCDONALD H, MCCULLOC M, CAPORASO F. Commercial scale irradiation for insect disinfestation preserves peach quality[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012, 81(6): 697-704.
- [7] 康芬芬, 魏亚东, 罗加凤. 辐照检疫处理对葡萄采后生理影响的初步研究[J]. 植物检疫, 2011, 25(2): 25-27.
- [8] 黄略略, 乔方, 方长发, 等. 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.
- [9] 罗美雨, 李文革. 辐照对柑橘保鲜效果的研究[J]. 湖南农业科学, 2009(6): 137-138.
- [10] 王秋芳, 乔勇进, 乔旭光. 高能电子束辐照对巨峰葡萄生理品质的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 571-577.
- [11] 童莉, 王欣, 雯茜姆, 等. 辐照对库尔勒香梨贮藏保鲜的研究[J]. 核农学报, 2004, 18(2): 134-136.
- [12] 马艳萍, 王国梁, 刘兴华, 等. ^{60}Co γ 射线辐照对鲜食核桃萌芽及相关生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(10): 2034-2039.
- [13] 杨文斌, 都德林, 吐尔迪. 辐照香梨在贮藏过程中几种挥发性成分的变化[J]. 辐射防护通讯, 1994, 14(4): 73-74.

- [14] 陆秋君. 贮前辐照处理对桃果实压缩特性与品质的影响[J]. 核农学报, 2006, 20(5): 410-413.
- [15] 傅俊杰, 冯风琴. 猕猴桃辐照保鲜效果的研究[J]. 核农学报, 2003, 17(5): 367-369.
- [16] 徐赞, 戚文元, 岳玲, 等. 高能电子束辐照处理对几种进口水果表皮色泽的影响[J]. 保鲜与加工, 2013, 13(2): 13-16.
- [17] 康芬芬, 彭扬思, 高健会, 等. γ 射线辐照处理对香蕉品质的影响[J]. 植物检疫, 2010, 24(4): 35-38.
- [18] 纪韦韦, 朱雅君, 宋青. 辐照检疫处理对香蕉货架品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(12): 309-310.
- [19] 陈志军, 孔秋莲, 岳玲, 等. 电子束辐照对进口葡萄色泽及保鲜效果的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2013, 31(6): 060402.
- [20] 金宇东, 汪昌保, 单国尧, 等. 辐照处理对水蜜桃感官品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(7): 271-273.
- [21] 赵菊鹏, 梁广勤, 胡学难, 等. ^{60}Co γ 射线辐照对莲雾番木瓜果实营养成分的影响[J]. 植物检疫, 2009, 23(2): 14-16.
- [22] 雷庆, 黄敏, 康菊. 电子束辐照草莓保鲜效果研究[J]. 核农学报, 2011, 25(3): 510-513.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 庞杰. 辐照对梁山柚脱苦的影响[J]. 食品与机械, 2000, 16(5): 19-20.
- [26] 康芬芬, 高健会, 魏亚东, 等. ^{60}Co γ 射线辐照处理对苹果中微量元素的影响[J]. 植物检疫, 2011, 25(1): 26-29.
- [27] 赵菊鹏, 梁帆, 胡学难, 等. ^{60}Co γ 射线对番石榴、芒果果实品质的影响[J]. 植物检疫, 2011, 25(4): 18-21.
- [28] 戚蓉迪, 颜伟强, 岳玲, 等. 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.
- [29] 吴庆, 岳玲, 孔秋莲, 等. 电子束辐照对进境芒果阳桃品质及货架期的影响[J]. 上海农业学报, 2013, 29(3): 40-43.
- [30] HUSSAIN P R, DAR M A, WANI A M. Effect of edible coating and gamma irradiation on inhibition of mould growth and quality retention of strawberry during refrigerated storage[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2012, 47(11): 2318-2324.
- [31] HUSSAIN P R, MEENA R S, DAR M A, et al. Effect of gamma-irradiation and refrigerated storage on mold growth and keeping quality of strawberry (*Fragaria* sp.) cv. Confitura[J]. Journal of Food Science and Technology, 2007, 44(5): 513-516.
- [32] MOSTAFAVI H A, MIRMAJLESSI S M, MIRJALILI S M. Gamma radiation effects on physico-chemical parameters of apple fruit during commercial post-harvest preservation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2012, 81(6): 666-671.
- [33] JITAREERAT P, UTHAIRATANAKIJ A, PHOTCHANACHA S, et al. Effect of packaging on postharvest disease development and quality of gamma irradiated litchi fruits[J]. Acta Horticulturae, 2013, 973: 145-149.
- [34] 王俊, 巢炎, 王剑平, 等. 辐照苹果的干燥特性研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 96-98.
- [35] 毕金峰, 丁媛媛, 王沛, 等. 品种和辐照处理对变温压差膨化苹果脆片产品品质的影响[J]. 核农学报, 2009, 23(4): 647-651.
- [36] 哈益明, 施惠栋, 王锋, 等. 电子束食品辐照的研究现状与应用特点[J]. 核农学报, 2007, 21(1): 61-64.
- [37] 杨朝崑, 陈琳, 乔丽雅, 等. 水果过敏及其过敏原基因组学研究进展[J]. 果树学报, 2010, 27(2): 281-288.
- [38] 顾可飞, 高美须, 李春红, 等. 辐照降低食物致敏性的研究进展[J]. 核农学报, 2006, 20(6): 524-526.
- [39] KONG Qiulian, WU Aizhong, QI Wenyuan, et al. Effects of electron-beam irradiation on blueberries inoculated with *Escherichia coli* and their nutritional quality and shelf life[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 95(1): 28-35.
- [40] YADAV M K, PATEL N L. Effect of gamma irradiation and storage temperature on post harvest rotting of Kesar mango[J]. Journal of Mycology and Plant Pathology, 2013, 43(2): 201-204.
- [41] PANDEY N, JOSHI S K, SINGH C P. Enhancing shelf life of litchi (*Litchi chinensis*) fruit through integrated approach of surface coating and gamma irradiation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 85: 197-203.