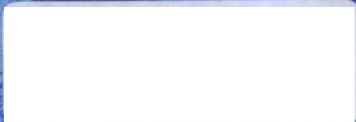


# 电子束辐照技术 在检疫处理中的应用

.....

张汀 李宗 张宇蔚 主编  
赖启基 主审



 中国质检出版社  
中国标准出版社

# 电子束辐照技术在检疫处理中的应用

张 汀 李 宗 张宇蔚 主编

赖启基 主审

中国质检出版社  
中国标准出版社

北 京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电子束辐照技术在检疫处理中的应用 / 张汀、李宗、张宇蔚主编. —北京: 中国质检出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-5026-3774-3

I. ①电… II. ①张…②李…③张… III. ①电子束—辐射—应用—检疫 IV. ①R185

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 020476 号

## 内 容 提 要

本书介绍了国内外电子束辐照检疫处理研究与应用的现状、电子束辐照检疫处理工作原理、电子束辐照的装置、电子束辐照技术在有害生物检疫处理和防治上的应用、电子束辐照在动物产品检疫处理中的应用以及电子束辐照检疫处理的监督管理。

本书可供从事动植物及产品检疫人员、检疫管理部门人员、电子束设计、生产和使用单位技术人员参考。

中国质检出版社  
中国标准出版社 出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: [www.spc.net.cn](http://www.spc.net.cn)

总编室: (010)64275323 发行中心: (010)51780235

读者服务部: (010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 12.75 字数 293 千字

2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月第一次印刷

\*

定价 42.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

## 编 委 会

主 任 张 汀

副主任 李 宗 张祥华

主 编 张 汀 李 宗 张宇蔚

副主编 袁建设 朱国强 张宏宇

主 审 赖启基

编 委 唐鄂生 李兆先 王栅栅 陶 洁

廖金虎 杨雪瑛 孙 萍 许 婧

张小风 陈爱娥 赵文娟 周建明

陆正清 范红悦 孙 政 孙冬玲

朱卫娟 孙灏明 徐燃霞 李 萌

李艳华

# 序 言

20年前，1992年3月的一天，我去看望钱三强先生，谈到我国的电子加速器技术已经走出了研究所的实验室，首台电子加速器装置在山东烟台电缆厂投入工业运行，为企业生产高性能电缆创造了价值时，钱先生听后很高兴地说，核技术和平利用大有作为。核技术可以为工农业生产，为人民的健康和衣食住行，做很多事情。我国的核事业是在极其困难的条件下依靠全国上下大力协同搞起来的，现在到了回报于民的时候了。

20年过去了，在改革开放、市场经济推动下，我国核技术在回报于民的道路上取得了不小的成绩。其中工业用电子加速器装置由当初的一两台，至现在增长超过200台；应用领域不断展宽，从电线电缆、热缩材料到医疗卫生用品消毒灭菌、食品保藏、环境治理等，经济社会效益日益显现。电子束辐射技术在我国出入境检疫领域被采用，称得上是核技术应用的新进展、新突破，它将为国家经济社会安全、为扩大企业国际交往、为人民生活质量的不断提高发挥重要的作用。

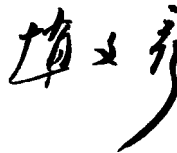
辐射法检疫技术是建立在核辐射（ $\gamma$ 射线或电子射线）作用于物质所产生的物理效应、化学效应或生物效应机理上的一种应用，它与其他检疫技术相比，具有更安全、快速、高效、节约资源、不影响货物品质等特点。目前，这项技术的研究与应用已引起有关国际组织和机构的高度重视，世界卫生组织已制定并颁布了相关的标准。美国、加拿大等国已经或正在制定电子束检疫处理法规，逐步推广和应用电子束检疫技术，预计随着世界经济一体化势态的发展，将会日渐推广和普及。

为满足在出入境检疫、卫生检疫、动植物检疫、商业储运和相关科研院所高校等的实际需要，由无锡出入境检验检疫局牵头，会同无锡爱邦辐射技术有限公司、华中农业大学、扬州大学等单位，并邀请有关学者共同编写了《电子束辐照技术在检疫处理中的应用》一书。该书阐述了电子射线灭菌的基本原理、介绍了电子射线检疫处理的技术与设施，电子射线技术在动植物检疫处理的应用及对应用的监督与管理等，这是我国第一部较全面的关于电子束辐照检疫的专著。

《电子束辐照技术在检疫处理中的应用》在编写过程中，坚持以国家检疫法规、技术标准为依据，坚持理论与实践相结合，参照有关资料，吸取了新的研究成果和经验，是检、学、研、企协作的重要成果。现代社会的发展是以科技创新为动力，以经

济社会和谐发展为目的，以法律为保障，《电子束辐照技术在检疫处理中的应用》一书的出版，正是体现了科技、经济、法律三者有机结合的有益尝试。

中国同位素与辐射行业协会会长



2012 年 12 月 17 日

本书的出版得到“质检公益性行业科研专项项目”（高能电子射线阻断有害生物综合应用技术研究项目）的支持。

# 目 录

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| 第1章 绪 论 .....                       | ( 1 )  |
| 1.1 国内外电子束辐照在检疫处理中的研究与应用现状 .....    | ( 1 )  |
| 1.2 电子束辐照技术在检疫处理应用的法律基础 .....       | ( 3 )  |
| 1.3 电子束辐照技术应用于检疫处理的趋势与前景 .....      | ( 4 )  |
| 第2章 电子束辐照检疫处理工作原理 .....             | ( 6 )  |
| 2.1 电离辐射检疫处理概述 .....                | ( 6 )  |
| 2.1.1 常规的化学杀虫灭菌方法 .....             | ( 6 )  |
| 2.1.2 电子辐照处理技术的机理、特点与适用性 .....      | ( 7 )  |
| 2.2 电离辐射的基本概念 .....                 | ( 8 )  |
| 2.2.1 放射性核素辐射源 .....                | ( 9 )  |
| 2.2.2 电子束辐射源 .....                  | ( 9 )  |
| 2.2.3 X射线辐照源 .....                  | ( 11 ) |
| 2.3 电离辐射的能量转移——物理过程 .....           | ( 12 ) |
| 2.3.1 电子束与物质的相互作用 .....             | ( 13 ) |
| 2.3.2 $\gamma$ 射线和X射线与物质的相互作用 ..... | ( 13 ) |
| 2.3.3 电离辐射的能量沉积 .....               | ( 15 ) |
| 2.3.4 吸收剂量 (Gy) 与当量剂量 (Sv) .....    | ( 15 ) |
| 2.3.5 辐射加工中经常用到的单位汇总 .....          | ( 17 ) |
| 2.4 辐射的化学效应 .....                   | ( 18 ) |
| 2.4.1 自由基及其反应 .....                 | ( 18 ) |
| 2.4.2 水和水溶液的辐射化学反应 .....            | ( 19 ) |
| 2.5 辐射的生物学效应 .....                  | ( 20 ) |
| 2.5.1 电离辐射的生物体效应 .....              | ( 20 ) |
| 2.5.2 辐照对储粮害虫的生物学效应 .....           | ( 22 ) |
| 2.6 电子束辐照检疫处理和辐照杀虫 .....            | ( 22 ) |
| 2.6.1 农产品、食品昆虫的危害 .....             | ( 23 ) |
| 2.6.2 电子束辐照杀虫 .....                 | ( 23 ) |
| 2.6.3 食品的辐照灭菌 .....                 | ( 24 ) |
| 2.7 辐照剂量的控制 .....                   | ( 27 ) |
| 2.7.1 果蔬类 .....                     | ( 27 ) |
| 2.7.2 粮食类 .....                     | ( 27 ) |
| 2.7.3 畜、禽肉及水产类的食品 .....             | ( 27 ) |
| 2.8 影响食品辐照效果的因素及条件控制 .....          | ( 28 ) |

|                                       |        |
|---------------------------------------|--------|
| 2.9 辐照食品的卫生安全 .....                   | ( 30 ) |
| 2.9.1 辐照食品没有放射性污染 .....               | ( 30 ) |
| 2.9.2 食品主要成分的营养卫生学 .....              | ( 30 ) |
| 2.9.3 电子束辐照对食品中生物活体的影响 .....          | ( 32 ) |
| 2.9.4 电子束辐射毒理学 .....                  | ( 35 ) |
| 2.10 FAO/IAEA/WHO 对辐照食品卫生安全性的评价 ..... | ( 35 ) |
| <b>第3章 电子束辐照的装置</b> .....             | ( 37 ) |
| 3.1 辐射装置概述 .....                      | ( 37 ) |
| 3.1.1 辐射装置的基本组成 .....                 | ( 37 ) |
| 3.1.2 辐照装置设计的基本出发点 .....              | ( 37 ) |
| 3.1.3 辐射装置的分类 .....                   | ( 38 ) |
| 3.1.4 $\gamma$ 射线辐照装置 .....           | ( 39 ) |
| 3.1.5 电子束辐照装置 .....                   | ( 40 ) |
| 3.1.6 X 射线辐照装置 .....                  | ( 45 ) |
| 3.2 电子加速器概述 .....                     | ( 47 ) |
| 3.3 高频高压加速器 .....                     | ( 48 ) |
| 3.3.1 高频高压加速器的工作原理 .....              | ( 48 ) |
| 3.3.2 爱邦 A B 型加速器的基本结构 .....          | ( 48 ) |
| 3.3.3 束流特性 .....                      | ( 49 ) |
| 3.4 电子直线加速器 .....                     | ( 50 ) |
| 3.4.1 特点分类及工作原理 .....                 | ( 50 ) |
| 3.4.2 电子直线加速器的基本组成 .....              | ( 50 ) |
| 3.4.3 束流特性 .....                      | ( 52 ) |
| 3.5 辐照的工艺控制 .....                     | ( 53 ) |
| 3.5.1 辐照工艺参数 .....                    | ( 53 ) |
| 3.5.2 辐照产品产率的估算 .....                 | ( 55 ) |
| 3.5.3 辐照剂量的不均匀度 .....                 | ( 56 ) |
| 3.5.4 X 射线辐照中剂量均匀性及能量利用效率 .....       | ( 63 ) |
| 3.5.5 电子辐照产品中最大及最小剂量分布 .....          | ( 65 ) |
| 3.5.6 吸收剂量极限值在辐照单元中位置的确定 .....        | ( 66 ) |
| 3.5.7 产品吸收剂量的控制与加速器的运行 .....          | ( 66 ) |
| 3.5.8 产品温度的上升与吸收剂量 .....              | ( 67 ) |
| 3.6 辐照剂量学 .....                       | ( 68 ) |
| 3.6.1 辐射加工剂量测量系统 .....                | ( 68 ) |
| 3.6.2 辐照工艺及质量控制 .....                 | ( 72 ) |
| 3.7 辐照成本与经济效益评估 .....                 | ( 73 ) |
| 3.7.1 建设费用 .....                      | ( 74 ) |
| 3.7.2 运行成本 .....                      | ( 74 ) |



|                                            |               |
|--------------------------------------------|---------------|
| 3.7.3 经济分析 .....                           | ( 74 )        |
| 3.8 辐射防护 .....                             | ( 75 )        |
| 3.8.1 电离辐射对人体的伤害 .....                     | ( 75 )        |
| 3.8.2 辐射致癌 .....                           | ( 79 )        |
| 3.8.3 辐射的遗传效应 .....                        | ( 79 )        |
| 3.8.4 辐射防护的标准及防护原则 .....                   | ( 79 )        |
| 3.8.5 辐射防护的三条基本原则 .....                    | ( 80 )        |
| 3.8.6 外照射防护有三种方法 .....                     | ( 81 )        |
| 3.8.7 辐射剂量监测 .....                         | ( 81 )        |
| 3.8.8 安全与事故管理 .....                        | ( 83 )        |
| 3.9 加速器辐射装置的屏蔽 .....                       | ( 85 )        |
| 3.9.1 辐射区域的类型及当量剂量的限值 .....                | ( 85 )        |
| 3.9.2 辐射屏蔽体厚度的评估 .....                     | ( 86 )        |
| 3.9.3 散射 X 射线的屏蔽: 迷宫, 管道, 屏蔽门 .....        | ( 87 )        |
| 3.9.4 天空反散射 .....                          | ( 90 )        |
| 3.9.5 臭氧浓度与通风 .....                        | ( 91 )        |
| 3.9.6 安全连锁系统 .....                         | ( 91 )        |
| 3.9.7 辐射监测 .....                           | ( 92 )        |
| <b>第 4 章 电子束辐照技术在有害生物检疫处理和防治上的应用 .....</b> | <b>( 94 )</b> |
| 4.1 储粮有害生物检疫处理和防治中应用 .....                 | ( 94 )        |
| 4.1.1 赤拟谷盗 .....                           | ( 94 )        |
| 4.1.2 印度谷螟 .....                           | ( 97 )        |
| 4.1.3 玉米象 .....                            | ( 102 )       |
| 4.1.4 米 象 .....                            | ( 107 )       |
| 4.1.5 杂拟谷盗 .....                           | ( 112 )       |
| 4.1.6 锯谷盗 .....                            | ( 117 )       |
| 4.1.7 花斑皮蠹 .....                           | ( 121 )       |
| 4.1.8 小眼书虱 .....                           | ( 126 )       |
| 4.1.9 嗜卷书虱 .....                           | ( 130 )       |
| 4.1.10 嗜虫书虱 .....                          | ( 133 )       |
| 4.2 粮食与经济作物有害生物检疫处理和防治中的应用 .....           | ( 137 )       |
| 4.2.1 稻粒黑粉菌 .....                          | ( 137 )       |
| 4.2.2 禾草腥黑粉菌 .....                         | ( 139 )       |
| 4.2.3 小麦矮腥黑粉菌 .....                        | ( 140 )       |
| 4.2.4 烟草甲 .....                            | ( 143 )       |
| 4.2.5 烟草粉螟 .....                           | ( 146 )       |
| 4.3 果蔬有害生物检疫处理和防治中的应用 .....                | ( 151 )       |
| 4.3.1 朱砂叶螨 .....                           | ( 151 )       |

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| 4.3.2 灰葡萄孢菌 .....                   | (155)        |
| <b>第5章 电子束辐照在动物产品检疫处理中的应用 .....</b> | <b>(160)</b> |
| 5.1 几种动物病毒的病原学及理化特性 .....           | (160)        |
| 5.1.1 牛传染性鼻气管炎病毒 .....              | (160)        |
| 5.1.2 新城疫 .....                     | (162)        |
| 5.1.3 鸡传染性法氏囊病毒 .....               | (165)        |
| 5.2 电子束辐照对不同病毒活性影响的研究 .....         | (167)        |
| 5.2.1 电子束辐照对新城疫病毒活性的影响 .....        | (167)        |
| 5.2.2 电子束辐照对鸡传染性法氏囊病毒活性的影响 .....    | (168)        |
| 5.2.3 电子束辐照对1型牛疱疹病毒活性的影响 .....      | (169)        |
| 5.3 电子束辐照技术在动物产品检疫处理的应用和前景 .....    | (170)        |
| 5.3.1 电子束辐照的特点 .....                | (170)        |
| 5.3.2 电子束辐照杀菌 .....                 | (170)        |
| 5.3.3 电子束肉类食品辐照 .....               | (171)        |
| 5.3.4 电子束食品保鲜辐照 .....               | (171)        |
| <b>第6章 电子束辐照检疫处理的监督管理 .....</b>     | <b>(173)</b> |
| 6.1 国外辐照检疫处理监督管理状况 .....            | (173)        |
| 6.1.1 国际辐照检疫处理的管理 .....             | (173)        |
| 6.1.2 各国辐照检疫处理的监督管理概况 .....         | (175)        |
| 6.2 我国电子束辐照检疫处理监督管理的现状 .....        | (177)        |
| 6.2.1 我国电子束辐照技术的应用和发展 .....         | (177)        |
| 6.2.2 我国电子束辐照检疫处理监督管理的现状 .....      | (178)        |
| 6.2.3 加强辐照检疫处理监督管理的必要性 .....        | (179)        |
| 6.3 加强我国电子束辐照检疫处理监督管理的对策和建议 .....   | (181)        |
| 6.3.1 建立和完善电子束辐照检疫处理的法规标准体系 .....   | (181)        |
| 6.3.2 建立和完善电子束辐照检疫处理监督管理协调机制 .....  | (183)        |
| 6.3.3 建立辐照装置认证制度 .....              | (184)        |
| 6.3.4 加强辐照检疫处理实验室检测监控 .....         | (185)        |
| 6.3.5 建立辐照检疫处理示范基地 .....            | (186)        |
| 6.3.6 其他探讨意见 .....                  | (186)        |
| <b>主要参考文献 .....</b>                 | <b>(188)</b> |
| <b>后 记 .....</b>                    | <b>(191)</b> |

# 第1章 绪 论

## 1.1 国内外电子束辐照在检疫处理中的研究与应用的现状

近几年国内外研究的热点在于电子束对医疗用品消毒灭菌、食品的辐射杀虫灭菌、植物类产品的进出口检疫等方面。医疗用品辐射灭菌是20世纪50年代末发展起来的一种新的灭菌工艺,这种新的灭菌技术在50年代前主要是进行实验规律及灭菌机理研究,直到1956年美国的Ethicon公司用电子直线加速器对手术缝线、一次性使用的注射器及针头进行辐射灭菌,使这一新技术进入了实用阶段。此后,美国、丹麦、西德、法国、苏联等国陆续建立了辐射灭菌装置(王炳林等,1987)。北京市辐照中心和东京都立同位素综合研究所共同研究了外科用丝质缝合线的电子束射线灭菌的效应,测定了初始污染程度和 $D_{10}$ 值的分布。此外,对辐照后材质性能也进行了理化分析,测试了拉伸强度,溶出物、OD值和溶出液的紫外吸收光谱等(钱思敏等,1989)。

除了在医疗卫生事业上的应用外,电子束辐照技术也大量应用于食品的灭菌。美国研究成功用电子束杀菌的技术,这种电子束杀菌很安全,不污染食品。适当能量的电子束辐照不会使食品残留感生发射放射性物质,而仅仅使食品产生化学或生物学变化。丁连忠等(1989)研究了花粉染菌的辐照效应及电子束辐照后花粉形态与成分的影响。测定了花粉中蛋白质、氨基酸、L-抗坏血酸等成分含量与剂量的关系。研究表明,电子束辐照是一种有效可行的花粉灭菌方法。

国内在粮食、水果等贮藏品的电子束辐照杀虫灭菌中应用得尤为广泛。吕季璋等(1995)研究HJ1Y-6M<sub>2</sub>型电子加速器产生的电子束对赤拟谷盗的辐照效应,发现518Gy辐照剂量可作为辐照防治赤拟谷盗的有效剂量,518Gy以上的剂量辐照的成虫在4周后100%死亡,赤拟谷盗不同发育阶段对电子束辐照的敏感度不同,卵最为敏感。李淑荣等(2005)用电子加速器辐照处理玉米象成虫以及隐藏于小麦籽粒中的玉米象卵、幼虫和蛹,研究不同发育阶段玉米象辐照后的繁殖力。结果表明,高于180Gy的辐照处理的成虫不能产生后代,辐照处理具有明显的当代延迟发育效果;高于180Gy剂量辐照处理玉米象的蛹,羽化出的成虫不能产生下一代成虫;高于90Gy以上的辐照处理玉米象的幼虫和卵,其羽化出的成虫不能产生下一代的成虫。180Gy辐照可以作为阻止不同虫态玉米象的继续繁殖下一代的有效剂量。温贤芳等(2004)用HJ1Y-6M<sub>2</sub>型电子加速器对玉米象成虫以及隐藏于小麦籽粒中的玉米象卵、幼虫和蛹进行辐照效应试验。结果表明,180Gy以上的剂量可以完全阻止谷物中幼虫和卵发育为成虫;在此剂量下有少量蛹可羽化为成虫,但存活力受严重影响,300Gy以上辐照的蛹即使羽化也在短时间内死亡;成虫被300Gy的电子束辐照后寿命大缩短,在14d内完全死亡。300Gy电子束辐照剂量可以作为辐照有效防治玉米象的剂量。陈云堂等(2011)利用不同剂量的电子束对杂拟谷盗幼虫、

成虫进行辐照处理,研究其辐照效应。结果表明:杂拟谷盗幼虫对电子束辐照的敏感性高于成虫。幼虫经 250Gy 剂量辐照后,可以完全阻止其发育为成虫,在 14d 内全部死亡;成虫经 250Gy 剂量辐照后,则需 42d 才能全部死亡,而且不能产生下一代成虫。250Gy 的剂量可以作为电子束辐照防治杂拟谷盗的参考剂量。范家霖等(2010)研究发现锯谷盗的幼虫、成虫对电子束辐照的敏感性依次降低。幼虫和成虫经辐照后 21d 的半致死剂量分别为 67.6Gy 和 104.2Gy。幼虫经 300Gy 剂量辐照后可以完全阻止其发育为成虫,并且在 35d 内全部死亡;成虫经 300Gy 剂量辐照后则需 49d 才能全部死亡,但不能产生下一代成虫。300Gy 剂量可以作为电子束辐照防治锯谷盗的参考剂量。黄曼等(2009)利用电子束动态辐照的方法对我国南方主要储粮害虫米象、谷蠹、赤拟谷盗等的辐照感应性及致死剂量进行了研究。同时对辐照后小麦的品质进行了分析。研究结果表明,经过 0.3kGy 和 0.6kGy 低剂量电子束辐照后能够有效防治储粮害虫,4~5 周内,0.3kGy 剂量对 3 种试验虫种的致死率为 100%,而 0.6kGy 剂量辐照后成虫在一周内死亡率达 100%,成虫对电子束辐照的敏感性分别为米象>赤拟谷盗>谷蠹。辐照后对小麦发芽率和发芽势有所影响,小麦(面粉)品质变化不明显,辐照样品的面团流变学特性、面筋指数和气味色泽没有明显变化。张婷等(2011)以灰葡萄孢病菌(*botrytis cinerea*)分生孢子为研究对象,采用 0.5、1.0、2.0、3.0kGy 剂量电子束辐照灰葡萄孢分生孢子,分别测定 5℃ 和 25℃ 培养条件下辐照对灰葡萄孢分生孢子的萌发活性及致病力的影响,结果表明:25℃ 和 5℃ 培养条件下,2.0kGy 处理分生孢子完全萌发时间比对照分别延迟了 5d 和 9d;24h 分生孢子萌发率分别降低了 46.57% 和 33.68%;芽管长度抑制率分别为 25.12% 和 74.29%;分生孢子对草莓的致病力显著降低,25℃ 培养 2d 时,经 2.0kGy 辐照处理后的分生孢子病情指数为 4.17;5℃ 培养 15d 时,病情指数仅为 15.28,显著低于对照。电子束处理可显著抑制灰葡萄孢菌分生孢子的萌发及芽管伸长,延迟其萌发时间,降低其致病力,且剂量越高,效果越明显。

20 世纪 60 年代末至 70 年代初,全世界掀起食品辐照热,美、日等发达国家建成若干以<sup>60</sup>Co 为辐射源的粮食辐照装置,试验其技术经济可行性。70 年代末,随着加速器技术的进步及其安全高效的优势,一些国家开始转向使用电子加速器处理食品(Bryan and Bruce, 2006)。随着电子加速器束流能量、束流功率和束下装置的提高和完善,电子束辐照在加工能力和经济效益方面表现出越来越大的优势,近年来已成为新型辐照加工装置的核心设备。来自同位素与辐射行业协会的统计表明,2005 年全国已建成功率 5kW 及以上的辐射加工用电子加速器达 83 台,总功率近 6469kW,另有 8 座大功率电子加速器装置正在建设中。加速器具有自动化程度高,可实现在线生产和无放射性废源产生。电子束能量可以调节,系统操控比较方便,产品吸收剂量均匀等优点(哈益明等,2007)。黄曼等(2010)研究了不同剂量电子束辐照对贮藏小麦微生物菌落的抑制作用,以及辐照后对小麦主要贮藏指标与加工品质的影响。试验结果表明,电子束辐照对贮藏小麦菌落总数有明显的抑制作用(显著性水平  $P < 0.01$ ),且辐照剂量越高菌落总数越低;不同剂量辐照后,对所有霉菌属的抑制效果均很显著(显著水平  $P < 0.01$ )。周任佳等(2011)采用 0.5、1.0、1.5、2.0kGy 四种剂量的高能电子束辐照处理鲜切哈密瓜用 PP 材质托盘和 PE 保鲜膜包装置于相对湿度 85%~95% 的冷库中贮藏,研究其对鲜切哈密瓜感官品质的影响和

对病原微生物的抑制作用,结果表明,电子束辐照能有效抑制病原微生物的生长,辐照剂量越大,抑制效果越好。王秋芳等(2010)用电子束400、700、1000、1500、2500(Gy)辐照及SO<sub>2</sub>处理巨峰葡萄后,置于温度-0.5℃~0.5℃相对湿度85%~95%冷库中贮藏,研究不同处理对巨峰葡萄微生物杀灭效果及贮藏品质的影响结果表明,电子束辐照能有效杀灭或抑制葡萄表面细菌、霉菌、酵母菌、大肠菌群的滋生繁殖,减轻葡萄贮藏过程中的腐烂现象。雷庆等(2011)采用电子加速器辐照草莓,并测定辐照对草莓微生物含量、腐烂指数、失重率及相关生物指标的影响,试验表明1.0、2.0、3.0(kGy)剂量的电子加速器辐照能减少草莓的微生物量,延缓草莓腐烂的速度,为草莓的保存提供良好的初始状态。王秋芳等(2011)也研究了对花椰菜微生物的杀灭效果及贮藏品质的影响。结果表明电子束辐照能有效控制花椰菜表面病原微生物的滋生繁殖,减轻贮藏过程中的腐烂现象。

## 1.2 电子束辐照技术在检疫处理应用的法律基础

辐照处理是继溴甲烷熏蒸即将被淘汰之后兴起的一种检疫处理技术,目前美国、澳大利亚、新西兰一些国家已批准将辐照技术用作检疫处理的一种方法,且有相应的商业化应用,尤其是美国州与州之间的水果调运、东南亚国家水果输美、澳大利亚与新西兰之间水果贸易均已应用辐照处理技术。辐照作为一种检疫处理方法,早在1989年美国就正式颁布了有关辐照作为一种植物卫生处理方法的制定规章的政策,经过逐步的修改和增加产品,在2000年5月USDA/APHIS通过了“辐照作为新鲜水蔬和园艺产品的检疫处理方法”的法规建议稿,允许辐照作为处理进口果蔬中11种主要果蝇和芒果象甲的检疫方法,在2002年3月APHIS又出了该法规的补充稿,这个法规的出台表明美国市场第一次对以检疫为目的的辐照处理水果和蔬菜开放。在2003年3月,美国加利福尼亚“墨西哥果蝇”疫区的柚子和柑橘,经辐照检疫处理杀死害虫后销往美国各地。美国政府和市场对辐照技术的重视,将对这项技术在世界各国发展起积极的推动作用。2009年以来,IPPC相继公布了实蝇类昆虫、苹果蠹蛾等6种水果害虫的辐照不育剂量,且当前美国USDA正极力向IPPC推荐将400Gy作为除鳞翅目蛹之外所有昆虫的不育通用剂量。可见,将辐照技术用作水果的检疫处理方法已成为国际发展趋势。在我国检验检疫行业,目前也正在积极制定辐照检疫处理相关的行业标准。

相关国际标准有:

国际植物检疫措施标准——辐照用作植物植物检疫措施的准则,联合国粮食及农业组织,《国际植物保护公约》秘书处,2003年,罗马;

国际植物检疫措施标准——ISPM28 限定有害生物的植物检疫处理(扎氏果实蝇 *Bactrocera jarvisi* 的辐射处理(2009),昆士兰果实蝇 *Bactrocera tryoni* 的辐射处理(2009),西印度甘薯象甲 *Euscepes postfasciatus* 的辐射处理(2011),甘薯小象甲 *Cylas formicarius elegantulus* 的辐射处理(2011),地中海实蝇 *Ceratitis capitata* 的辐射处理(2011)等)。

国家标准和行业标准有:

GB/T 21659—2008 植物检疫措施准则 辐照处理 中华人民共和国国家标准;

SN/T 1887—2007 进出口辐照食品良好辐照规范 中华人民共和国出入境检验检疫行业标准；

GB/T 23748—2009 辐照食品的鉴定 DNA 彗星试验法 筛选法 中华人民共和国国家标准；

GB/T 18524—2001 食品辐照通用技术要求 中华人民共和国国家标准；

GB/T 18526.3—2001 脱水蔬菜辐照杀菌工艺 中华人民共和国国家标准；

GB 14891.3—1997 辐照干果果脯类卫生标准 中华人民共和国国家标准；

GB 14891.5—1997 辐照新鲜水果、蔬菜类卫生标准 中华人民共和国国家标准；

GBZ 141—2002  $\gamma$ 射线和电子束辐照装置防护检测规范 中华人民共和国国家职业卫生标准；

NY/T 1895—2010 豆类、谷类电子束辐照处理技术规范 中华人民共和国农业行业标准；

GB/T 22545—2008 宠物干粮食品辐照杀菌技术规范 中华人民共和国国家标准。

### 1.3 电子束辐照技术应用于检疫处理的趋势与前景

随着世界经济一体化发展的不断深入，我国进出口商品的数量和品种迅速增长，检疫害虫的防范压力也随之大幅度增加。检疫处理是检验检疫工作的重要组成部分，在防范外来有害生物入侵、传播、扩散，保护本国生态环境，保护农、林、牧、渔业的健康具有重要意义，对我国而言，检疫技术在有效突破国外贸易技术壁垒、扩大我国农产品出口方面作用显著，是我国出入境检验检疫机构执法把关的重要环节（康芬芬，詹国平，黄庆林等，2010）。

传统的检疫方法主要依赖化学熏蒸技术控制检疫害虫，口岸检疫处理使用的化学熏蒸剂特别是溴甲烷、环氧乙烷等熏蒸剂是剧毒的致癌物质，对操作人员的健康构成威胁，而且溴甲烷还是破坏大气臭氧层的元凶，熏蒸剂排放到大气中对环境也造成了污染，作为国境口岸主要熏蒸剂的溴甲烷面临被限制使用和逐渐停产的命运，根据1997年9月17日蒙特利尔公约规定，要求发达国家至2010年完全停止溴甲烷的使用，发展中国家到2015年完全停止使用（方剑锋，2005）。目前溴甲烷理想的替代物尚未发现，且有些产品则不宜使用熏蒸处理的方法，如冷冻禽产品、畜产品、海产品等冷冻产品，进口鱼粉及骨粉等。一方面是因为在0℃以下时，使用溴甲烷等多种熏蒸剂熏蒸无效，另一方面是因为许多熏蒸剂对杀灭害虫、鼠类等有明显效果，而对杀灭细菌、真菌往往效果不佳，此外，熏蒸后货架期缩短，熏蒸剂使用后残留严重等诸多问题使熏蒸处理方法正面临严峻挑战（马以桂和徐丽萍，2002）。

由于化学处理的弊端日益显现，国内外积极开展了热处理技术、低温技术和辐照技术等物理学处理方法的研究。

热处理在食品、医疗卫生用品等领域的消毒灭菌上广泛使用，但是冷冻产品不适宜采用热处理；热处理法还容易因为木材中心温度没达到要求而造成处理失效；热水浸泡法处理水果会缩短水果贮藏期，并产生植物毒性；处理苗木、花卉会造成叶片干缩、失绿等现

象,且各种苗木对热水的耐性差异很大,不易掌握;被处理物品种类受限制,处理时间长,有时会影响品质。低温处理主要用在水果和蔬菜的除害处理上,但对热带水果、亚热带水果容易引起冻害,因此美国、澳大利亚等国家都制定了有关冷处理的应用范围。低温处理的最大缺点是耗时长,并需要先进的制冷设备(李德山,段刚,赵汗青等,2003)。

辐照技术作为原子能和平利用技术的一部分,在提高食品安全性和植物安全方面已得到越来越多国家和国际组织的重视。早在20世纪50年代食品辐照技术的发展和应用的初始阶段,人们就认识到辐照作为检疫处理方法的可能性(高美须,2003)。

辐照检疫处理就是利用 $\gamma$ 射线或电子加速器产生的高能电子或X射线直接照射被处理货物,使其携带的害虫不能完成发育周期或病原菌完全死亡,达到防止这些危险性有害生物在一个新的地方定植、传播或蔓延的目的(FAO,2003)。辐照处理以杀虫效果好、无残留,不提高处理对象温度、不必拆包装、操作易于控制、加工效率高和处理成本低等特点而成为21世纪最有前途的检疫处理技术之一。

在常用的这几种辐照源中,电子加速器产生的高能电子射线有以下优点:束流功率大,处理速度快;可根据货物的尺寸、种类和数量选择加速器的能量和束流强度;加速器可以随时停机,停机后没有剩余的射线,因此安全;射线能量可集中在同一方向,利用率高。与传统的热工艺及化学熏蒸相比,可节省人力、物力、降低毒性,工作连续性强,操作方便,维修简单,屏蔽性能强,对操作人员安全(夏克胜等,2001)。因此,相较于其他两种辐射源,高能电子射线在检疫上应用优势已经显现,其应用范围将更广阔。

目前已有高能电子处理检疫性有害生物的一些研究,孔秋莲(2010)等用不同剂量的电子束辐照进口的甜樱桃,结果表明辐照处理未导致甜樱桃果实总可溶性固形物、还原糖、可滴定酸含量的显著损失。徐朝哲等(2008)采用ESS-010-03电子直线加速器对检疫性害虫的适用性进行了研究,确定用400Gy的处理剂量能够有效杀灭水果中的橘小实蝇2~3龄幼虫,获得很好的处理效果,并对经过处理的13种水果的多项理化指标及风味检测研究证明,400Gy的处理剂量不会对水果产生不良影响,确认该装置用400Gy辐照剂量能作为水果检疫处理的方法。小麦矮腥黑穗病(简称TCK)为我国进境一类危险病害,进口的小麦原粮常带有TCK冬孢子,需进行检疫处理,卢志恒等(2000)应用电子辐照处理小麦矮腥黑穗菌冬孢子,实验室直接研究结果表明,5kGy的剂量可使冬孢子丧失萌发力失去活性,同时他们还注意到电子辐照处理延迟了冬孢子的萌发,可能是控制小麦矮腥黑穗病在中国土地上繁衍的有效剂量,但这有待结合田间种植进一步研究。清华大学同方威视技术股份有限公司发明了一项实用新型专利,涉及农林业产品检疫除害处理技术领域,提供一种利用电子束进行原木检疫辐照的装置,该装置包括加速器、传送装置及屏蔽结构,加速器以原木为中心对阵布置,实现了安全与效率兼顾;检疫处理效率高、不受环境温度限制、使用安全、不破坏环境、操作方便(康克军,胡海峰,唐传祥等,2008)。

尽管熏蒸处理等传统方法目前仍是植物检疫最主要和最有效的手段之一,但其明显的局限性使检疫部门期待更高效、环保、快速、安全、经济的检疫处理技术,随着电子加速器的不断发展和应用,相关法律法规的不断完善,高能电子射线辐照检疫处理将快速发展,前景将更广阔,将在植物检疫中发挥重要作用。

## 第2章 电子束辐照检疫处理工作原理

### 2.1 电离辐射检疫处理概述

#### 2.1.1 常规的化学杀虫灭菌方法

粮食辐照处理旨在杀灭粮食中的仓储害虫、霉菌及检疫性危险病菌、有害杂草籽实。达到减少储粮损失，防止外来生物入侵，控制人—动物共患疾病传播等多重目标。近年来，随着我国对植物检疫日趋严格，辐照法作为粮食检疫处理措施的重要性日益突出。

我国储粮害虫的防治主要依赖于化学药剂的熏蒸，常用的熏蒸剂主要有：

(1) 磷化氢：常用的谷物及其加工产品熏蒸剂。自 1936 年来在世界上广泛应用，20 世纪 60 年代在中国开始应用，至今仍是“王牌熏蒸剂”。

(2) 溴甲烷：常用熏蒸剂，可以作为杀虫剂和消毒杀菌剂，1932 年开始使用。对大气中的臭氧层有破坏作用。在中国常用于检疫害虫的熏蒸。

(3) 环氧乙烷（氧化乙烯，ETO）：广泛用于消毒医疗用品和仪器，在中国也用于杀灭粮食检疫对象如小麦矮腥黑穗病（TCK）。但 20℃ 以下反应缓慢或不反应，中国大部分地区不能常年使用。

以上各种熏蒸剂都存在一种或几种不良性质，限制了它们的适用范围。目前只有磷化氢、氯化苦、敌敌畏、溴甲烷、环氧乙烷等少数几种熏蒸剂尚在一定范围使用。

随着人们对自然界认识的加深和环保意识的增强，更多的熏蒸剂面临淘汰的命运。

##### (1) 环保因素

比较典型的例子是溴甲烷。溴甲烷是破坏大气臭氧层物质（ODP），对大气臭氧层的破坏能力为 0.7，包括中国在内 120 个国家参加的蒙特利尔协议呼吁限制和淘汰溴甲烷的应用。此外在用溴甲烷熏蒸作业时，粮食中会残留有机溴等潜在致癌物质。

##### (2) 熏蒸剂残留毒性因素

20 世纪八十年代前后的研究发现，环氧乙烷熏蒸处理后的粮食残留有毒物质。国内研究表明，用环氧乙烷熏蒸后的小麦，能检出有毒物质 2-氯乙醇。国外研究表明，残留物中有 1, 2-乙二醇、2, 2-氧化乙二醇、溴乙醇等有毒物质。国际上已经确认环氧乙烷是一种典型的诱变剂和致癌物。2000 年 2 月，国际化学品临时评审委员会（ICRC）对环氧乙烷作出如下决定：“该化学品可用于农药、工业原料和医疗消毒，是一种明确的人类致癌物”。国际组织 WHO/ILO/UNIP 成立的环氧乙烷专家组也认为：“环氧乙烷是一种致癌物，在环境中应尽量维持在低水平”。目前，许多国家开始逐步禁用环氧乙烷。

##### (3) 虫害抗性增加的因素

几乎所有化学熏蒸剂存在着虫类的抗性问题的。联合国粮农组织（FAO）曾在 61 个国



家采集样品,对储粮害虫抗性进行监测。目前已知有31种害虫对87种杀虫剂和12种熏蒸剂产生了抗性。

此外,比较典型的是磷化氢,在我国已应用30多年,目前80%以上的储粮用其熏蒸处理。近年来,许多害虫对磷化氢也产生了比较严重的抗性,使磷化氢的杀虫效果大打折扣。例如郑州粮食学院1995年~1997年在中国19个省采集了6种害虫73个品系测定其对磷化氢的抗性,发现其中米象中的抗性品系抗性系数最高达1052倍;谷蠹最大抗性系数达596倍。如果任其发展下去,磷化氢也将被淘汰。由于我国地域广阔,生态环境复杂,常规的储粮技术如低温、气调等,受到能源和材料等限制,实际应用区域有限。因此,储粮害虫的防治工作,任务十分艰巨。

## 2.1.2 电子辐照处理技术的机理、特点与适用性

辐照杀虫是利用电离辐射与害虫的相互作用所产生的物理、化学和生物效应,导致害虫不育或死亡的一种物理防虫技术。

### 2.1.2.1 辐照杀虫的发展

利用辐照杀防治储粮害虫的研究可以追溯到20世纪初,1916年Runner利用X射线处理烟草甲,发现X射线可使烟草甲产生不育效应和死亡。第二次世界大战后,和平利用核能日益受到重视,辐照杀虫技术逐步开展了广泛深入的研究。经过一个世纪的发展,辐照杀虫技术已经成为食品辐照加工中最为成熟的一项技术。1984年,国际食品法典委员会(CAC)通过了“辐照食品通用标准”和“食品辐照设施推荐规程”等标准,极大推动了食品辐照加工技术的应用,目前已有40多个国家批准了200多种辐照食品,年市场销售总量达30万吨左右。用于辐照食品处理的主要是 $\gamma$ 射线( $^{60}\text{Co}$ )、电子束(10MeV以下)或X射线(5MeV以下)。 $^{60}\text{Co}$ 源装置由于设备简单,运行维护方便,被广泛的应用于食品保藏领域,特别是小包装食品的辐照处理。世界上已有32个国家建立了 $\gamma$ 射线的食品辐照中心,果蔬、肉类和药材等进行目的为杀虫灭菌的辐照处理,如美国已建立了20个辐照装置,并用于35种食品辐照。乌克兰于20世纪80年代初,建立了一座电子加速器辐照装置,用于小麦进口检疫处理。我国辐照加工起步于20世纪50年代,1958年我国就成立了粮食辐照杀虫研究协调小组,开展了辐射对储粮害虫的生物学效应、辐射对粮食品质的影响、以及辐照食品的卫生安全性等研究。自1984年以来,我国为应用辐照食品技术,兴建了几个大型钴源辐照中心,辐照加工产业化发展迅速。我国的电子加速器辐照技术的开发和应用相对滞后,与钴源相比,电子加速器更安全,而且无核废料,不会造成核污染等社会负面效应,对环境无任何危害作用,不受装源能力的限制,更有利于产业化,因此近年来受到更多的重视。

### 2.1.2.2 电子束辐照杀虫灭菌技术的特点

利用电子束辐照粮食的技术经过多年研究、实践与发展,已成为一项成熟的储粮新技术,与化学熏蒸法比较,其主要优点是:

(1) 灭菌杀虫彻底:可以100%杀灭粮虫。电子束辐照对杀灭虫卵有特效。经处理后