储粮害虫专栏

电离辐照防治储藏物害虫和微生物的研究进展*

王 磊[1**] 吴云龙[1] 何仕均[2] 鲁玉杰[1***]

（1. 江苏科技大学粮食学院，镇江 212100；2. 清华大学核能与新能源技术研究院，北京 100084）

摘 要 电离辐照加工技术是利用高能射线对食品和农产品进行辐照处理，使害虫或微生物发生电离效应而死亡，达到杀虫灭菌和食品保鲜的目的，广泛应用于农产品贮藏保鲜、食品病原微生物控制和食品品质改善等领域。为探讨电离辐照技术在储藏物害虫和微生物防治中的应用，本文系统性总结了目前辐照射线的种类和特点，包括γ射线、X射线和电子束，并总结了辐照射线对储藏物害虫和微生物的生理效应影响，包括害虫生殖、消化和抗氧化酶系统。不同害虫及微生物种类，其发育期和生理状态对电离辐照的敏感性不同。氧气浓度和温度等环境因素也影响电离辐照杀灭害虫和微生物的效果。本文通过系统总结电离辐照对储藏物害虫和微生物的生理生化影响，以及生物因素和环境因素对辐照杀虫灭菌效率的影响，旨在为电离辐照技术在粮食储藏中的实践应用提供科学指导，同时为制定新型、高效、绿色的害虫综合治理策略奠定理论基础。

关键词 电离辐照；储藏物害虫；食品微生物；害虫防治；环境因素

Progress in the use of ionizing radiation to manage both insect pests and microorganisms in stored-products

WANG Lei[1**] WU Yun-Long[1] HE Shi-Jun[2] LU Yu-Jie[1***]

(1. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212100, China;
2. Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET), Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Irradiation technology uses high-energy rays to induce ionization effects in insect pests and microorganisms, leading to their death. It is widely used to protect stored agricultural products, for foodborne pathogen control, and to improve food quality. This review systematically summarizes the types and characteristics of radiation used, including gamma rays, X-rays and electron beams, and summarizes the physiological effects of irradiation on insect pests and microorganisms, including on the reproductive, digestive, and antioxidant enzyme, systems. Different insect pests and microorganisms, as well as pest developmental stages and physiological conditions, vary in their sensitivity to ionizing radiation. The effectiveness of irradiation also depends on the ambient oxygen concentration and temperature. This review provides guidance for the practical application of ionizing radiation to protect stored grain, and a theoretical basis for the development of novel, effective, and environmentally-friendly, integrated pest management strategies.

Key words ionizing radiation; stored product pests; microorganisms; pest control, environmental factors

*资助项目 Supported project：苏州市发改委项目（JSZC-320500-CLGL-C2024-0001）

**第一作者 First author，E-mail：wanglei-best@just.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：luyjlyj71@just.edu.cn

收稿日期 Received：2024-07-08；接受日期 Accepted：2025-01-17

粮食是基本的民生商品，粮食安全关系到我国的宏观经济运行，社会的和谐稳定和国家的独立发展，是实现国家总体安全的重要基础。习近平总书记强调："解决好十几亿人的吃饭问题，始终是我们党治国理政的头等大事"。然而，2020 年至今，新冠疫情、自然灾害、极端气候等极大的冲击全球粮食供应链，给我国的粮食安全带来了新的潜在风险。据统计，我国粮食在储藏、运输和加工等产后环节，每年的损失量达 700 亿斤，其中储粮害虫为害造成的损失占总损失量的 10%-30%。储粮害虫引发的粮食减损，严重威胁我国的粮食安全。

目前，全世界对储粮害虫的防治主要是依赖化学杀虫剂，但是由于过度依赖化学农药以及长期不合理使用，已经引起了严重的害虫抗药性（Phillips and Throne, 2010）。此外，杀虫剂引发的环境污染、农药残留等问题迫使人们寻求新的绿色防治方法。我国地域广阔，生态环境复杂，富氮低氧，高（低）温等储粮技术受仓房条件、能源和储粮环境等条件限制，无法在全国普遍推广应用。电离辐照（Ionizing radiation）技术是利用高能射线或加速器产生的粒子流照射储藏物，通过射线与害虫的相互作用，导致害虫不育或死亡的物理防治技术（Mshelia *et al*., 2023）。电离辐照防治储藏物害虫最早由 Runner 研究发现，X 射线导致烟草甲 *Lasioderma serricorne* 产生不育后代（Hallman, 2013）。特别是 20 世纪 50 年代解决了铯-137（^{137}Cs）和钴-60（^{60}Co）放射辐射源问题，极大推动了辐照杀虫技术在食品加工中的应用。目前，已经有至少 33 个国家允许使用辐照处理包括果蔬、肉类和药材等 200 多种储藏物商品，减少了储藏物商品的损失，取得了巨大的经济效益（Hallman, 2013）。与常规的储藏物害虫和微生物防治技术相比，辐照杀虫灭菌技术具有操作方便、穿透力强、能耗低、无污染和经济可行等优点，但也同时存在辐照设备前期投入费用大，放射性辐照源的核泄漏潜在危险等缺点（Moirangthem and Baik, 2021）。随着辐照杀虫及灭菌技术的发展，虽无法完全替代现有的防治方法，但其独特的应用优点在储藏物害虫和微生物防治中有着巨大的产业化前景。为了深入了解电离辐照技术，本文就电离辐照的种类特点、对储藏物害虫和微生物的生理状态影响以及辐照效率的影响因素等多方面进行总结。

1　电离辐照的种类及特点

电离辐射是原子以电磁波（γ 或者 X 射线）或者粒子（中子、β 或 α）形式传递时所释放的一种能量。目前用于辐照食品处理的主要是 γ 射线、X 射线和电子束。放射性元素铯-137 和钴-60 衰减放射出的 γ 射线可用于辐照储藏物商品。^{137}Cs 由钚和铀裂变产生，放射出能量为 0.66 MeV 的 γ 射线，半衰期 30.07 年，而 ^{60}Co 是天然的 ^{59}Co 通过中子在高能辐照反应堆中辐照适当时间产生的，能够产生能量为 1.33 和 1.17 MeV 的 γ 射线，半衰期 5.27 年。虽然 ^{137}Cs 理论上可用于粮食辐照，但由于 ^{137}Cs 溶于水，实际应用受到限制，不适合工业化应用。线性加速器产生电子束（Electron beam）和 X 射线。电子束是电子经加速器加速而产生的高速电子流，能量高达 10 MeV。将电子束撞击重金属（钽或金）会产生能量高达 7.5 MeV 的 X 射线(转化率约 14%)，其余以热量的形式释放（Hallman, 2013）。这 3 种辐照用射线中，γ 射线穿透力最强，但剂量率低；X 射线穿透力次之；电子束的穿透力最弱，剂量率最高（李光涛等, 2007）。X 射线和电子束的剂量可调。由于辐照用 γ 射线，X 射线和电子束同属于低线性能量转移值的射线，因此其生物学效应相差不大。与产生 γ 射线的钴-60 装置相比，电子加速器没有放射源，没有核废料，不存在核泄漏的潜在危害，操作简便，剂量产生效率更高。辐照电子束流强度和能量可根据实际应用进行调节，更适合于工业化生产，具有广阔的应用前景。

2　电离辐照对储藏物害虫的生理效应

高能量的电离辐照粒子能够直接损伤 DNA，打断化学键，最终导致碱基损伤、DNA 单链或双链断裂。此外，电离辐射可产生大量的

活性氧（Reactive oxygen species, ROS）。辐照射线能够瞬间（10^{-9} s）电离生物体内的水分子，产生自由基和电子。这些自由基和电子能够分别与其他水分子和氧气分子反应，二次产生自由基，进而形成持续的氧化胁迫（Pryor, 1986; Kam and Banati, 2013; Zhou *et al*., 2018）。ROS 能够破坏核酸、大分子蛋白和细胞膜等细胞成分和结构。

电离辐照能够从核酸、蛋白质、细胞、生长发育和繁殖等各个水平破坏害虫和微生物正常的生理代谢，影响害虫的生长发育和繁殖能力，最终致死害虫和微生物。如害虫经辐射处理后，一般会出现体重减轻、胚胎异常、滞（绝）育、畸形、影响子代雌雄性比等，此外，辐照还可以影响害虫的取食和消化等。

2.1 电离辐照对害虫生殖系统的影响

一般情况下，细胞对辐照的敏感性与细胞分化程度呈反比，与细胞的分裂活性成正比。成虫性腺细胞的分裂活动异常旺盛，DNA 修复机制不完善，一旦受到射线攻击，极易发生染色体断裂、易位，形成不育配子，与正常成虫交配的合子死亡，故可以使用一定剂量辐照处理，导致害虫不育，或者产生的卵不能孵化。如绿豆象 *Callosobruchus chinensis* 成虫经 γ 射线处理后产生的卵不能孵化（Chiluwal *et al*., 2019）。经 γ 射线辐射后的粗足粉螨 *Acarus siro* 性原细胞发生内质网膨胀，线粒体脊瓦解，线粒体基质发生髓磷脂化，导致精子发生中断，减少产生精细胞（周利娟等, 2004）。赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*（Pa *et al*., 1970）和四纹豆象 *Callosobruchus maculatus*（Sang *et al*., 2016）蛹经电离辐照处理发育成的雌虫，卵巢和卵细胞发育不全，没有繁殖能力，或者其产生的卵不孵化。γ 射线导致谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium* 雌虫的产卵率降低，辐照雄虫产生的 F_1 代只有约 3%的幼虫完成羽化，且 F_1 代成虫没有繁殖能力（Mansour, 2016）。Ibrahim 等（2017）使用 20 Gy 剂量的 γ 射线辐照四纹豆象雄虫，其产生 F_1 和 F_2 代的不育率分别为 70.8%和 88.3%，进一步的生理学研究表明电离辐照导致精细胞发生畸变，精子细胞核发生染色质致密化，鞭毛和精核不规则性增大，线粒体代谢异常。

2.2 电离辐照对害虫消化系统的影响

电离辐照对害虫的中肠组织影响较大，一定剂量的辐照可导致中肠组织离散，破坏再生细胞和上皮组织，柱状上皮细胞产生无序泡状物，阻碍营养吸收最终导致害虫死亡（周利娟等, 2004）。如经 γ 射线处理后的杂拟谷盗 *Tribolium confusum* 出现再生胞窝增多现象，柱状上皮细胞核肿大并产生无序排列的泡状物，落入中肠腔中，导致基膜和鞘肌松散（Jafri and Ismail, 1977）。实蝇科害虫，如地中海实蝇 *Ceratitis capitate* 和墨西哥实蝇 *Anastrepha ludens* 的研究也表明，电离辐射能够损害它们中肠的上皮细胞，进而降低繁殖竞争力（Lauzon and Potter, 2012）。而桑文（2016）通过研究电子束对四纹豆象幼虫蛋白水解酶的活性影响，发现电子束辐照并不影响四纹豆象蛋白消化酶活性，中肠蛋白酶水解能力不受电子束辐照的影响。Andres 等（2007）通过研究 γ 射线对地中海实蝇胰蛋白酶、糜蛋白酶、氨基肽酶和羧肽酶的活性影响，表明 70 或者 140 Gy 的 γ 射线不影响地中海实蝇成虫的消化活性。这些结果表明不同的辐照方式、害虫物种和辐照条件可能对害虫的消化系统产生不同的影响。此外，一定剂量的 γ 射线对害虫的食道神经节有一定影响。如经 γ 射线处理后的昆士兰实蝇 *Bactrocera tryoni* 和地中海实蝇幼虫食道神经节明显缩小，且缩小量与剂量相关（Lescano *et al*., 1994）。

2.3 电离辐照对害虫抗氧化酶的影响

有关辐照对害虫体内酶影响的研究主要集中在双翅目害虫酚氧化酶和抗氧化酶方面，而电离辐照对鞘翅目储藏物害虫抗氧化酶系统影响的研究较少。一定剂量辐照可引起酚氧化酶活性的降低，进而影响表皮的黑化率。辐照电离生物体内的水分产生的 ROS 导致氧化胁迫，害虫对辐照的耐受能力与体内的抗氧化能力密切相关。经 γ 射线处理后的瓜实蝇 *Zeugodacus cucurbitae*，活性氧（ROS）、过氧化氢酶（CAT）、过氧化物

酶（POD）和超氧化物歧化酶（SOD）的活性显著上升（Ahmad *et al*., 2021）。在摇蚊中，Cu/Zn 型 SOD、POD 以及谷胱甘肽过氧化氢酶，在 γ 射线处理 1 h 后上调表达 10 倍以上(Gusev *et al*., 2010)。加勒比按实蝇 *Anastrepha suspensa* 中，过表达 SOD 显著提高辐照雄虫的交配能力(Dias *et al*., 2021)。王殿轩等（2011）研究了电子束辐照对赤拟谷盗保护酶系的影响，表明 CAT、POD 和 SOD 随辐照剂量的增加呈先上升后下降的趋势。鳞翅目害虫 Sf9 细胞系中，SOD、谷胱甘肽还原酶（GST）和硫氧还蛋白受 γ 射线诱导上调表达（Suman *et al*., 2009）。

3　电离辐照对食品微生物的影响

电离辐照杀灭微生物的原理与储藏物害虫类似，根据作用方式不同分为直接作用和间接作用。射线直接作用于微生物蛋白、核酸和脂类，改变生物化学性质，从而达到杀灭微生物的目的。间接作用是射线辐照水分子，形成水合电子、羟自由基、过氧化氢等带电物质，作用于蛋白质等生物大分子，导致其结构和功能丧失，达到杀灭微生物的目的（何凯锋等, 2023）。

近年来，电离辐照在杀灭粮食微生物技术中得到研究和应用。使用电子束辐照能够杀灭大米中的大肠杆菌 *Escherichia coli* 和芽孢杆菌 *Bacillus cereus*（Sarrías *et al*., 2003）。Shad 等（2019）研究表明，使用 14 kGy 剂量的电子束辐照能够杀灭杂交长粒水稻中 99%的微生物。潘丽红（2021）的研究表明使用电子束辐照对两种水分稻谷（11.97%和 15.03%）中的微生物具有显著的杀灭作用。未经辐照处理的稻谷储藏 6 个月后，低水分稻谷和高水分稻谷中的菌落总数分别增加了 20 和 38 倍，而经过电子束辐照处理后的低水分稻谷和偏高水分稻谷中菌落总数分别增加了 15 和 14 倍，电子束辐照对于偏高水分稻谷的灭菌效果更加显著。同样，低剂量电子束辐照能够杀灭稻谷中的霉菌。稻谷经 1 kGy 辐照处理后，霉菌总数均降低到 10 CFU/g(Sarrías *et al*., 2003)。陈晓平等（2016）研究表明，使用电子束辐照能够灭活大米中 99%的微生物。黄曼（2010）研究电子束辐照对小麦储藏过程中霉菌影响，表明电子束辐照能够显著抑制储藏小麦种中的菌落总数，包括交链霉属 *Alternaria*、曲霉属 *Aspergillus*、镰刀菌属 *Fusarium*、青霉属 *Penicillium* 和根霉属 *Rhizopus*，经辐照处理后的小麦矮腥黑穗病菌 *Tilletia controversa* 孢子萌发率下降，萌发数量减少。

电离辐照在其他食品领域同样具有灭菌效果。王娴等（2019）研究了电子束辐照和 γ 射线辐照对花生和芝麻中的霉菌影响，表明经辐照处理后霉菌含量均大幅降低。冯雨宸等（2023）研究证明低能电子束能够杀灭冻肉外包装表面微生物，包括大肠杆菌、金黄色葡萄球菌 *Staphylococcus aureus* 和枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*。近年来的研究表明，电离辐照可以杀灭食品中的副溶血性弧菌 *Vibrio parahaemolyticus*、单增李斯特菌 *Listeria monocytogenes* 和鼠伤寒沙门氏菌 *Salmonella enterica* 等（Su *et al*., 2004; Zhu *et al*., 2008; Song *et al*., 2009; Odai *et al*., 2019; 罗宗洪, 2023）。

此外，辐照技术也在畜禽养殖中得到广泛应用，国际原子能机构早在 1963 年就证明 γ 射线能够有效杀灭动物来源饲料中沙门氏菌（Salmonella）等致病性微生物。Derouchey 等（2003）的研究表明 γ 辐照能够显著降低玉米、豆粕、乳清、血浆蛋白、鱼粉、大豆油中的微生物菌落数量。魏浩（2019）研究了不同剂量的 γ 射线对不同饲料原料中微生物的影响，包括菌落数量、氨基酸组分、抗营养因子含量、维生素含量及体外消化率的影响，表明 γ 射线能够显著降低不同来源饲料中的微生物菌落数量。

4　影响电离辐照杀虫灭菌的因素

4.1　不同害虫和微生物种类的辐照效应

不同害虫物种对电离辐照的敏感性不同。一般而言，鳞翅目储藏物害虫的辐照耐受性最强，蜱螨目和啮虫目次之，鞘翅目害虫的耐受性最弱。根据国际昆虫灭杀和绝育数据库（International database on insect disinfestation and sterilization，https://www.iaea.org/resources/

databases/ididas), 我们总结了主要储藏物昆虫的辐照不育和致死剂量（表 1）。鞘翅目、啮虫目和蜱螨目害虫的致死剂量和不育剂量一般在 300 Gy 以下，而鳞翅目害虫的不育剂量和致死剂量高达 600 Gy 以上。郭东权等（2016）检测使用电子束辐照防治长角扁谷盗 *Cryptolestes pusillus*、锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus* 和土耳其扁谷盗 *Cryptolestes turcicus* 成虫的 LD_{99}

表 1 主要储藏物害虫的辐照敏感性

Table 1 Radiation sensitivity of the main stored-product pests

目 Order	科 Family	种 Species	不育剂量（Gy） Sterilization dose (Gy)	致死剂量（Gy） Disinfestation dose (Gy)
鞘翅目 Coleoptera	窃蠹科 Anobiidae	烟草甲 *Lasioderma serricorne*	30	125
		药材甲 *Stegobium paniceum*	30	250
	长角象科 Anthribidae	咖啡豆象 *Araecerus fasciculatus*	-	250
	长蠹科 Bostrichidae	大谷蠹 *Prostephanus truncates*	<150	120
		谷蠹 *Rhyzopertha dominica*	160	120
	豆象科 Bruchidae	菜豆象 *Acanthoscelides obtectus*	100	>100
		鹰嘴豆象 *Callosobruchus analis*	80	-
		绿豆象 *Callosobruchus chinensis*	80	100
		四纹豆象 *Callosobruchus maculatus*	80	200
	象甲科 Curculionidae	谷象 *Sitophilus granarius*	60	100
		米象 *Sitophilus oryzae*	100	200
		玉米象 *Sitophilus zeamais*	100	200
	皮蠹科 Dermestidae	谷斑皮蠹 *Trogoderma granarium*	100	200
		花斑皮蠹 *Trogoderma variabile*	300	300
	扁谷盗科 Cucujidae	锈赤扁谷盗 *Cryptolestes ferrugineus*	200	-
		长角扁谷盗 *Cryptolestes pusillus*	200	-
	锯谷盗科 Silvanidae	锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*	117	200
	拟步甲科 Tenebrionidae	黄粉虫 *Tenebrio molitor*	60	150
		赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*	35	350
		杂拟谷盗 *Tribolium confusum*	60	-
鳞翅目 Lepidoptera	麦蛾科 Gelechiidae	麦蛾 *Sitotroga cerealella*	280	600
	螟蛾科 Pyralidae	干果斑螟 *Cadra cautella*	600	1 000
		地中海粉螟 *Ephestia kuehniella*	200	350
		印度谷螟 *Plodia interpunctella*	350	500
	卷蛾科 Tortricidae	苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*	300	400
啮虫目 Psocoptera	书虱科 Liposcelididae	嗜卷书虱 *Liposcelis bostrychophila*	-	300
		嗜虫书虱 *Liposcelis entomophila*	-	300
		小眼书虱 *Liposcelis paeta*	-	300
蜱螨目 Acari	螨科 Acaridiidae	粗足粉螨 *Acarus siro*	250	300
	粉螨科 Acaridae	腐食酪螨 *Tyrophagus putrescentiae*	260	>260

分别为 280.2、260.4 和 281.3 Gy。电子束辐照防治玉米象 *Sitophilus zeamais*、嗜虫书虱 *Liposcelis entomophila* 和印度谷螟 *Plodia interpunctella* 的有效剂量分别为 180、300 和 600 Gy（李淑荣等, 2005; 王殿轩等, 2010; 范家霖等, 2011），而使用 γ 射线辐照防治绿豆象和杂拟谷盗的有效剂量分别为 320 和 200 Gy（郭东权等, 2009; 刘昌燕等, 2014; 王争艳等, 2016）。赤拟谷盗磷化氢抗性品系和敏感品系成虫 24 d 内全部死亡所需的辐照剂量分别为 300 和 400 Gy，说明即使是同一个物种，不同的害虫品系对电离辐照的敏感性仍然存在差异（陈云堂等, 2015）。

不同种类的微生物对辐照的敏感性不同。一般情况下，耐热性强的微生物对辐照的耐受性较强。三大类微生物的耐受性顺序为：细菌芽孢 > 酵母 > 霉菌和细菌营养体。微生物的种类和数量、环境温度、氧气含量、食品的营养成分都会影响辐照的杀菌效果（Shahi *et al*., 2021）。如 Nagar 等（2017）和 Zhang 等（2021）使用低能 X 射线处理干豆蔻，表明鼠伤寒沙门氏菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和单核细胞增生李斯特菌的 D10 值分别为 53.57、71.43、114.64 和 87.74 Gy。黄曼（2010）研究了电子束辐照对储藏小麦中微生物的影响，证明不同种类的霉菌对电子束辐照的敏感性不同，依次为：交链霉属 > 曲霉属 > 镰刀菌属 > 青霉属 > 根霉属。

4.2　害虫不同生理阶段对辐照效果的影响

不同发育期的同一害虫物种对辐照的敏感性也不尽相同。储藏物害虫的发育大多需经历卵、幼虫、蛹和成虫四个阶段，每个阶段具有不同的生理生化变化。一般情况下，储藏物害虫的成虫对辐照敏感性最弱，蛹次之，卵和幼虫的辐照敏感性最强。储藏物害虫在不同的发育阶段受辐照后的致死效应不同，卵和幼虫的致死剂量相差不大（李光涛等, 2007）。电离辐照造成 DNA 突变、缺失和断裂，阻碍了正常的细胞分化和分裂，进而导致害虫发育畸形。卵和幼虫发育为成虫要经过更多的细胞分裂，因此卵和幼虫对辐照更加敏感。辐照和活性氧产生的损伤会随着 DNA 复制和细胞增殖逐渐扩大。害虫在蛹期经历着复杂的生理重组，包括幼虫的组织降解和成虫的组织形成，电离辐照干扰该变态过程，阻碍了幼虫正常发育到成虫的形态结构转变。此外，相比于雄虫，雌虫对电离辐照更加敏感，非滞育害虫比滞育害虫敏感，休眠幼虫比非休眠幼虫敏感（Enfield *et al*., 1983）。

4.3　氧气浓度对辐照效果的影响

环境中的氧气含量对辐照杀菌效果有显著的影响。一般说来，有氧气存在的情况下，辐照杀菌的效果更好。实际使用辐照对食品杀菌时，多在有氧状态下进行（黄曼, 2010）。与此相反，低氧环境能够提高储粮害虫对电离辐照的耐受性。正常氧气浓度下，电离辐照防治麦蛾的不育剂量是 500 Gy，而在低氧条件下，这一辐照剂量需要提高至 670 Gy（Hallman and Phillips, 2008）。四纹豆象幼虫在常氧条件下，经过 30、50 和 100 Gy 的电子束辐照处理后，其羽化率分别为 28%、5% 和 0，但是低氧预处理的幼虫，同样辐照剂量下其羽化率分别提升至 60%、20% 和 5%（Wang *et al*., 2019）。

植物检疫中的研究也发现，低氧环境增强检疫害虫对电离辐照的耐受性，包括苹果果实蝇 *Rhagoletis pomonella*、梨小食心虫 *Grapholita molesta*、玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 和梅球颈象 *Conotrachelus nenuphar*（Yamada *et al*., 2020）。如低氧条件下的苹果果实蝇幼虫需要更高的辐照强度抑制其发育成蛹（Hallman, 2004b）。常氧条件使用 200 Gy 的辐照剂量造成梨小食心虫全部死亡，而在低氧条件下同样辐照剂量，仍然有 5.3% 的 5 龄幼虫经处理后羽化（Hallman, 2004a）。

辐照滞育是害虫不育技术（Sterile insect technique, SIT）的重要内容，但是 Sassù 等（2019）发现，低氧胁迫能够减缓或者中和电离辐照对害虫的不利影响。如斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* 雌虫在常氧和低氧条件下的不育辐照剂量分别为 75 和 90 Gy。Yamada 等（2020）研究表明低氧环境能够显著提高埃及伊蚊 *Aedes aegypti*、白纹伊蚊 *Aedes albopictus* 和阿拉伯按蚊 *Anopheles arabiensis* 在辐照处理后的交配能力。地中海实

蝇（Nestel *et al*., 2007）、仙人掌螟 *Cactoblastis cactorum*（López-Martínez *et al*., 2014）和加勒比按实蝇（Dias *et al*., 2021）中的研究发现，低氧环境提高害虫的抗氧化能力，减弱电离辐照诱发的氧化损伤，最终减缓辐照对害虫的滞（绝）育作用。

4.4 温度对辐照效果的影响

环境温度对辐照杀虫的研究主要集中在进出口货物检测检疫上。电离辐照（50 Gy）处理结合低温储藏（1 ℃储藏 5 d）能够有效杀除葡萄柚中的加勒比按实蝇。Palou 等（2007）使用 X 射线（30 Gy）联合低温胁迫（1 ℃处理 2 d）防治柑橘中的地中海实蝇。辐照结合低温处理不仅可以降低辐照剂量、减少处理时间、节省防治费用，而且能够最大程度降低对辐照敏感商品的质量影响。

此外，温度影响辐照对害虫生长发育的抑制作用。低温能够增强紫外线 UVB 对棉叶螨 *Tetranychus urticae* 卵的杀灭效率（Nakai *et al*., 2018）。须舌蝇 *Glossina palpalis gambiensis* 经辐照（110 Gy）联合低温（5 ℃）处理后，雄虫的交配能力明显下降（Mutika *et al*., 2019）。害虫在低温条件下（4 和 11 ℃），亚致死辐照剂量（30 Gy）对地中海实蝇和瓜实蝇幼虫羽化抑制作用更强（Follett and Snook, 2013）。与此相反，Ernawan 等（2022）研究表明，埃及伊蚊蛹和成虫在低温条件下（11-13 ℃）具有更强的辐照抗性。温度影响辐照效率的原因可能是环境温度影响害虫呼吸和新陈代谢速度，进而影响辐照雄虫的交配能力（Yamada *et al*., 2019），也有学者认为低温导致害虫发生休眠或者滞育等适应性生理反应，进而减缓辐照刺激后的生长发育速度，最终减少辐照引发的机体损伤。

总之，影响电离辐照杀灭害虫和微生物效率的因素包括生物因素（害虫和微生物物种、发育期、生理状态等）和环境因素（氧气浓度、温度等）。虽然辐照技术在食品杀虫灭菌等领域取得了一定进展，但是电离辐照对不同生理状态下害虫和微生物的影响还不明确，特别是环境因素影响电离辐照防治储藏物害虫和微生物的分子机理还需要大量和深入的研究。

5 总结与展望

电离辐照技术是保持粮食品质，抑制虫霉发生的重要绿色储藏技术，近些年来在我国发展迅速。电离辐照主要包括 γ 射线、X 射线和电子束。其中电子加速器产生的 X 射线和电子束不受辐照源限制，剂量率高，辐照强度和能量可以调节，更适合于工业化生产。辐照射线产生活性氧，破坏核酸蛋白质三维结构，影响害虫的生殖、消化和抗氧化酶系统。此外，不同的害虫和微生物种类，发育期和生理状态对电离辐照的敏感性不同。低氧环境增强害虫和微生物对电离辐照的耐受性，低温影响辐照害虫的生长发育。

电离辐照技术作为一种安全、有效、绿色的害虫防治方法，是害虫综合治理的重要内容。虽然电离辐照在害虫不育技术，进出口货物检疫等领域取得了一定进展，但是对储藏物害虫，特别是储粮害虫的研究较少，阻碍电离辐照在粮食储藏行业的大规模推广。此外，电子束辐照杀虫灭菌技术规程和相关法律法规的缺失，影响消费者对辐照粮食的产品认同度，未来应加快制订辐照储粮的工艺标准，以期指导粮食行业电离辐照技术产业化。

参考文献 (References)

Ahmad S, Hussain A, Ullah F, Jamil M, Ali A, Ali S, Luo YP, 2021. ^{60}Co-γ radiation alters developmental stages of *Zeugodacus cucurbitae* (Diptera: Tephritidae) through apoptosis pathways gene expression. *Journal of Insect Science*, 21(5): 16.

Andres VS, Ortego F, Castañera P, 2007. Effects of gamma-irradiation on midgut proteolytic activity of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae). *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 65(1): 11–19.

Chen XP, Meng Y, Jin Y, Wang H, Zhang Q, 2016. Killing effect of high energy electron beam irradiation on main microorganisms in rice. *Food Science*, 37(8): 63–66. [陈晓平, 孟岩, 金玉, 王欢, 张青, 2016. 高能电子束辐照对大米中微生物的杀灭效果. 食品科学, 37(8): 63–66.]

Chen YT, Guo DQ, Li X, Lu YJ, Wang ZY, Shang FF, Wang JJ, Yang BA, Xu B, Dong WJ, Cheng ZJ, Fan JL, Shang BL, 2015.

Effect of electronic beam irradiation on phosphine resistant and susceptible of *Tribolium castaneum* (Herbst). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 29(3): 472–477. [陈云堂, 郭东权, 李湘, 鲁玉杰, 王争艳, 商飞飞, 王娟娟, 杨保安, 许勃, 董威杰, 程仲杰, 范家霖, 尚丙兰, 2015. 电子束对磷化氢抗性品系和敏感品系赤拟谷盗成虫的辐照效应. 核农学报, 29(3): 472–477.]

Chiluwal K, Kim J, Bae SD, Roh GH, Park HJ, Park CG, 2019. Effect of gamma irradiation on fecundity, sterility, and female sex pheromone production of *Callosobruchus chinensis* (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Economic Entomology*, 112(1): 156–163.

DeRouchey JM, Tokach MD, Nelssen JL, Goodband RD, Dritz SS, Woodworth JC, Webster MJ, James BW, 2003. Effects of blood meal pH and irradiation on nursery pig performance. *Journal of Animal Science*, 81(4): 1013–1022.

Dias VS, Cáceres C, Parker AG, Pereira R, Demirbas-Uzel G, Abd-Alla AM M, Teets NM, Schetelig MF, Handler AM, Hahn DA, 2021. Mitochondrial superoxide dismutase overexpression and low oxygen conditioning hormesis improve the performance of irradiated sterile males. *Scientific Reports*, 11(1): 20182.

Enfield FD, North DT, Erickson R, Rotering L, 1983. A selection response plateau for radiation resistance in the cotton boll weevil. *Theoretical and Applied Genetics*, 65(4): 277–281.

Ernawan B, Anggraeni T, Yusmalinar S, Ahmad I, 2022. Investigation of developmental stage/age, gamma irradiation dose, and temperature in sterilization of male *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in a sterile insect technique program. *Journal of Medical Entomology*, 59(1): 320–327.

Fan JL, Chen YT, Li XZ, Guo DQ, Lv XH, Zhang JW, Yang BA, Liu JY, Tian ZJ, Zhang XY, 2011. Effect of electronic beam irradiation on development of *Plodia interpunctella* (Hübner). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 25(6): 1206–1210. [范家霖, 陈云堂, 李旭照, 郭东权, 吕晓华, 张建伟, 杨保安, 刘江豫, 田占军, 张晓燕, 2011. 电子束辐照对印度谷螟发育的影响. 核农学报, 25(6): 1206–1210.]

Feng YC, Lan WS, Xian JH, Fang ZK, Liu XX, Li P, Deng WJ, Yu DJ, 2023. Evaluation of disinfection effect of low electron bean irradiation on three indicator microorganisms. *China Port Science and Technology*, 5(2): 81–85. [冯雨宸, 兰文升, 洗嘉恒, 方泽坤, 刘宵宵, 李萍, 邓伟江, 余道坚, 2023. 低能电子束辐照对 3 种指示微生物消毒效果评价. 中国口岸科学技术, 5(2): 81–85.]

Follett PA, Snook K, 2013. Cold storage enhances the efficacy and margin of security in postharvest irradiation treatments against fruit flies (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(5): 2035–2042.

Guo DQ, Chen YT, Zhang JW, Yang BA, Yang ZQ, Wang YL, 2009. Irradiation effect of ^{60}Co γ-rays on adults of *Tribolium confusum*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 25(15): 183–186. [郭东权, 陈云堂, 张建伟, 杨保安, 杨忠强, 王玉莲, 2009. ^{60}Co γ 射线对杂拟谷盗成虫的辐照效应研究. 中国农学通报, 25(15): 183–186.]

Guo DQ, Wang ZY, Lu YJ, Li X, Shang FF, Fan JL, Wang JJ, Yang BA, Xu B, Dong WJ, Cheng ZJ, Chen YT, Shang BL, 2016. Effect of electronic beam irradiation on Cucujidae insects-control and the qualities of wheat. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 31(2): 98–102. [郭东权, 王争艳, 鲁玉杰, 李湘, 商飞飞, 范家霖, 王娟娟, 杨保安, 2016. 电子束辐照防治扁甲科害虫及对小麦品质影响. 中国粮油学报, 31(2): 98–102.]

Gusev O, Nakahara Y, Vanyagina V, Malutina L, Cornette R, Sakashita T, Hamada N, Kikawada T, Kobayashi Y, Okuda T, 2010. Anhydrobiosis-associated nuclear DNA damage and repair in the sleeping chironomid: Linkage with radioresistance. *PLoS ONE*, 5(11): e14008.

Hallman GJ, 2004a. Ionizing irradiation quarantine treatment against oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in ambient and hypoxic atmospheres. *Journal of Economic Entomology*, 97(3): 824–827.

Hallman GJ, 2004b. Irradiation disinfestation of apple maggot (Diptera: Tephritidae) in hypoxic and low-temperature storage. *Journal of Economic Entomology*, 97(4):1245–1248.

Hallman GJ, 2013. Control of stored product pests by ionizing radiation. *Journal of Stored Products Research*, 52: 36–41.

Hallman GJ, Phillips TW, 2008. Ionizing irradiation of adults of Angoumois grain moth (Lepidoptera: Gelechiidae) and Indianmeal moth (Lepidoptera: Pyralidae) to prevent reproduction, and implications for a generic irradiation treatment for insects. *Journal of Economic Entomology*, 101(4): 1051–1056.

He KF, Chen XJ, Zang P, Dong HS, Zhang MY, Li ZZ, 2023. Research progress on the effect of irradiation sterilization on food quality and its control. *Food and Fermentation Industries*, 49(10): 299–305. [何凯锋, 陈秀金, 臧鹏, 董海胜, 张梦莹, 李兆周, 2023. 辐照杀菌技术对食品品质的影响及控制研究进展. 食品与发酵工业, 49(10): 299–305.]

Huang M, 2010. Effects of electron beam-line irradiation on insecticide/bactericidal and wheat quality. Doctor dissertation. Guangzhou: South China University of Technology. [黄曼, 2010. 电子束辐照在线杀虫/菌效果及对小麦品质影响的研究. 博士学位论文. 广州: 华南理工大学.]

Ibrahim HA, Fawki S, Abd El-Bar MM, Abdou MA, Mahmoud DM, El-Gohary EE, 2017. Inherited influence of low dose gamma radiation on the reproductive potential and spermiogenesis of the cowpea weevil, *Callosobruchus maculatus* (F) (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10(4): 338–347.

Jafri RH, Ismail M, 1977. Cytological lesions in the midgut of *Tribolium confusum* larvae exposed to gamma radiation. *Journal of Invertebrate Pathology*, 29(1): 10–17.

Kam WW, Banati RB, 2013. Effects of ionizing radiation on mitochondria. *Free Radical Biology and Medicine*, 65: 607–619.

Lauzon CR, Potter SE, 2012. Description of the irradiated and nonirradiated midgut of *Ceratitis capitata* Wiedemann (Diptera: Tephritidae) and *Anastrepha ludens* Loew (Diptera: Tephritidae) used for sterile insect technique. *Journal of Pest Science*, 85(2): 217–226.

Lescano HG, Congdon BC, Heather NW, 1994. Comparison of two potential methods to detect *Bactrocera tryoni* (Diptera: Tephritidae) gamma-irradiated for quarantine purposes. *Journal of Economic Entomology*, 87(5): 1256–1261.

Li GT, Cao Y, Sun H, Li YY, 2007. Application of irradiation for insect disinfestations of cereal grain. *Grain Storage*, 36(2): 10–16. [李光涛, 曹阳, 孙辉, 李燕羽, 2007. 辐照技术在储粮害虫防治中的应用. 粮食储藏, 36(2): 10–16.]

Li SR, Wang DX, Gao MX, Yuan K, Wen XF, 2005. Effect of electronic beam irradiation on reproductive ability of maize weevil. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 19(1): 46–48. [李淑荣, 王殿轩, 高美须, 原锴, 温贤芳, 2005. 电子束处理对玉米象繁殖力的影响. 核农学报, 19(1): 46–48.]

Liu CY, Wan ZH, Zhong JF, Li L, Chen HW, Liu LJ, Wu GH, 2014. Irradiation effects of ^{60}Co on *Callosobruchus chinensis* L. (Coleoptera: Bruchidae). *Hubei Agricultural Sciences*, 53(19): 4607–4610. [刘昌燕, 万正煌, 仲建锋, 李莉, 陈宏伟, 刘良军, 伍广洪, 2014. 绿豆象的辐照致死效应研究. 湖北农业科学, 53(19): 4607–4610.]

López-Martínez G, Carpenter JE, Hight SD, Hahn DA, 2014. Low-oxygen atmospheric treatment improves the performance of irradiation-sterilized male *Cactus* moths used in SIT. *Journal of Economic Entomology*, 107(1): 185–197.

Luo ZH, 2023. Effects of electron beam irradiation on inactivation of pathogenic microorganisms and quality of cold chain large yellow croaker. Master dissertation. Guangzhou: South China University of Technology. [罗宗洪, 2023. 电子束辐照对病原微生物灭活效果评价以及对冷链大黄鱼品质的影响. 硕士学位论文. 广州: 华南理工大学.]

Mansour M, 2016. Irradiation as a phytosanitary treatment against *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae). *Florida Entomologist*, 99(2):138–142.

Moirangthem TT, Baik OD, 2021. Disinfestation of stored grains using non-chemical technologies-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 107: 299–308.

Mshelia RD, Dibal NI, Chiroma SM, 2023. Food irradiation: An effective but under-utilized technique for food preservations. *Journal of Food Science and Technology*, 60(10): 2517–2525.

Mutika GN, Parker AG, Vreysen MJB, 2019. Tolerance to a combination of low temperature and sterilizing irradiation in male *Glossina palpalis gambiensis* (Diptera: Glossinidae): Simulated transport and release conditions. *Journal of Insect Science*, 19(5): 1.

Nagar V, Godambe LP, Shashidhar R, 2017. Radiation sensitivity of planktonic and biofilm-associated *Shigella* spp. and *Aeromonas* spp. on food and food-contact surfaces. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(1): 258–265.

Nakai K, Murata Y, Osakabe M, 2018. Effects of low temperature on spider mite control by intermittent ultraviolet-B irradiation for practical use in greenhouse strawberries. *Environmental Entomology*, 47(1): 140–147.

Nestel D, Nemny-Lavy E, Mohammad Islam S, Wornoayporn V, Cáceres C, 2007. Effects of pre-irradiation conditioning of medfly pupae (Diptera: Tephritidae): Hypoxia and quality of sterile males. *Florida Entomologist*, 90(1): 80–87.

Odai BT, Tano-Debrah K, Addo KK, Saalia FK, Akyeh ML, Torgby-Tetteh W, Mills SWN, Azanu D, 2019. The role of gamma irradiation and storage at 28±2 ℃ on the inactivation of *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* and *Salmonella enterica* serotype Typhimurium in Sun-dried Legon-18 pepper (*Capsicum annuum*) powder. *International Journal of Food Contamination*, 6: 7.

Pa BN, Ali IA, Salam MA, 1970. Effects of gamma radiation on the reproductive organs in the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst). *University Journal of Zoology*, 25: 11–14.

Palou L, Del-Río MA, Marcilla A, Alonso M, Jaques Miret JA, 2007. Combined postharvest X-ray and cold quarantine treatments against the Mediterranean fruit fly in “Clemenules” mandarins. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 5(4): 569–578.

Pan LH, 2021. Effect of electron beam irradiation on storage quality and starch properties of rice with high moisture content. Master dissertation. Wuxi: Jiangnan University. [潘丽红, 2021. 电子束辐照对偏高水分稻谷储藏品质及淀粉性质的影响. 硕士学位论文. 无锡: 江南大学.]

Phillips TW, Throne JE, 2010. Biorational approaches to managing stored-product insects. *Annual Review of Entomology*, 55(1): 375–397.

Pryor WA, 1986. Oxy-radicals and related species: Their formation, lifetimes, and reactions. *Annual Review of Physiology*, 48: 657–667.

Sang W, 2016. Response mechanisms of *Tribolium castaneum* and *Callosobruchus maculatus* exposure to physical agents. Doctor dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [桑文, 2016. 赤拟谷盗与四纹豆象对物理因子胁迫的响应机制研究. 博士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]

Sang W, Speakmon M, Zhou L, Wang Y, Lei CL, Pillai SD, Zhu-Salzman K, 2016. Detrimental effects of electron beam

irradiation on the cowpea bruchid *Callosobruchus maculatus*. *Pest Management Science*, 72(4): 787–795.

Sarrías JA, Valero M, Salmerón MC, 2003. Elimination of *Bacillus cereus* contamination in raw rice by electron beam irradiation. *Food Microbiology*, 20(3): 327–332.

Sassù F, Nikolouli K, Pereira R, Vreysen MJB, Stauffer C, Cáceres C, 2019. Irradiation dose response under hypoxia for the application of the sterile insect technique in *Drosophila suzukii*. *PLoS ONE*, 14(12): e0226582.

Shad ZM, Steen E, Devlieghere F, Mauromoustakos A, Atungulu GG, 2019. Biochemical changes associated with electron beam irradiation of rice and links to kernel discoloration during storage. *Cereal Chemistry*, 96(5): 824–835.

Shah S, Khorvash R, Goli M, Ranjbaran SM, Najarian A, Mohammadi NA, 2021. Review of proposed different irradiation methods to inactivate food-processing viruses and microorganisms. *Food Science & Nutrition*, 9(10): 5883–5896.

Song HP, Kim B, Jung S, Choe JH, Yun H, Kim YJ, Jo C, 2009. Effect of gamma and electron beam irradiation on the survival of pathogens inoculated into salted, seasoned, and fermented oyster. *LWT-Food Science and Technology*, 42(8): 1320–1324.

Su YC, Duan J, Morrissey TM, 2004. Electron beam irradiation for reducing *Listeria monocytogenes* contamination on cold-smoked salmon. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 13(1): 3–11.

Suman S, Seth RK, Chandna S, 2009. Mitochondrial antioxidant defence in radio-resistant Lepidopteran insect cells. *Bioinformation*, 4(1): 19–23.

Wang DX, Li SR, Han H, Gao MX, Lin M, Cui Y, 2010. Irradiation effect of electron beam on the survival rate and reproduction for *Liposcelis entomophila*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(5): 910–914. [王殿轩, 李淑荣, 韩辉, 高美须, 林敏, 崔莹, 2010. 电子束辐照对嗜虫书虱存活与繁殖力的影响. 昆虫知识, 47(5): 910–914.]

Wang DX, Wang JL, Li SR, Gao MX, Xu W, Lin M, Cui Y, 2011. Effect of electron beam irradiation on activities of peroxidase catalase and superoxide dismutase of *Tribolium castaneum* (Herbst). *Grain Storage*, 40(4): 10–12. [王殿轩, 王晶磊, 李淑荣, 高美须, 徐威, 林敏, 崔莹, 2011. 电子束辐照对赤拟谷盗保护酶系的影响. 粮食储藏, 40(4): 10–12.]

Wang L, Cheng WN, Meng J, Speakmon M, Qiu JP, Pillai S, Zhu-Salzman K, 2019. Hypoxic environment protects cowpea bruchid (*Callosobruchus maculatus*) from electron beam irradiation damage. *Pest Management Science*, 75(3): 726–735.

Wang X, Cui L, Dong WJ, Xu B, Lü XH, Yang SQ, Chen YT, 2019. Influence of electron beam and γ ray on oxidation and mold of oil plants. *Packaging Engineering*, 40(3): 30–37. [王娴, 崔龙, 董威杰, 许勃, 吕晓华, 杨世清, 陈云堂, 2019. 电子束和γ射线对油料氧化及霉菌的影响. 包装工程, 40(3): 30–37.]

Wang ZY, Wang WD, Lu YJ, Hao SJ, Xu L, 2016. Control of *Callosobruchus chinensis* L. with electron beam radiation and its effects on mung quality. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 31(10): 93–97, 107. [王争艳, 王文铎, 鲁玉杰, 郝思婧, 许蕾, 2016. 电子束辐照防治绿豆象及对绿豆品质的影响. 中国粮油学报, 31(10): 93–97, 107.]

Wei H, 2019. Effects of gamma-ray irradiation on total bacteria colonies and nutritional value of feed ingredients. Master dissertation. Ya'an: Sichuan Agricultural University. [魏浩, 2019. γ-射线辐照对饲料微生物菌落及营养价值的影响. 硕士学位论文. 雅安: 四川农业大学.]

Yamada H, Maiga H, Bimbile-Somda NS, Carvalho DO, Mamai W, Kraupa C, Parker AG, Abrahim A, Weltin G, Wallner T, Schetelig MF, Caceres C, Bouyer J, 2020. The role of oxygen depletion and subsequent radioprotective effects during irradiation of mosquito pupae in water. *Parasites & Vectors*, 13(1): 198.

Yamada H, Maiga H, Juarez J, De Oliveira Carvalho, D, Mamai W, Ali A, Bimbile-Somda NS, Parker AG, Zhang DJ, Bouyer J, 2019. Identification of critical factors that significantly affect the dose-response in mosquitoes irradiated as pupae. *Parasites & Vectors*, 12: 435.

Zhang HF, Seck HL, Zhou WB, 2021. Inactivation of *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli* O157: H7, *Staphylococcus aureus*, and *Listeria monocytogenes* in cardamom using 150 KeV low-energy X-ray. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 67: 102556.

Zhou HP, Qian LX, Zhang N, Gu JJ, Ding K, Wu J, Lu ZW, Du MY, Zhu HM, Wu JZ, He X, Yin L, 2018. MIIP gene expression is associated with radiosensitivity in human nasopharyngeal carcinoma cells. *Oncology Letters*, 15(6): 9471–9479.

Zhou LJ, Hu MY, Xu HH, Huang JG, Zhong GH, 2004. Recent studies on the physiological effect of irradiation on insects. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 18(1): 77–80, 62. [周利娟, 胡美英, 徐汉虹, 黄继光, 钟国华, 2004. γ辐射对昆虫生理影响的研究进展. 核农学报, 18(1): 77–80, 62.]

Zhu MJ, Mendonca A, Ismail HA, Ahn DU, 2008. Effects of irradiation on survival and growth of *Listeria monocytogenes* and natural microflora in vacuum-packaged turkey hams and breast rolls. *Poultry Science*, 87(10): 2140–2145.