DOI:10.12441/spyswjs.20250730001 [文章编号] 1673-1689(2025)10-0019-09

电子束辐照对谷物贮藏及其品质影响的研究进展

陈秀霞[1] 张 斌[2*]

(1. 广西工商职业技术学院粮油与管理学院,广西 南宁 530007; 2. 广西质量工程职业技术学院食品药品与健康管理学院,广西 南宁 530105)

摘要:传统谷物贮藏方法存在诸多弊端,电子束辐照是新兴的非热处理技术,因高效、环保且对谷物品质影响小而受关注。作者阐述了电子束辐照的原理及其在食品工业中的应用,综述了其对谷物贮藏期间有害生物、理化性质和感官品质的影响,并对其应用前景进行了展望,以期推动其在食品贮藏领域的进一步推广应用。

关键词:电子束辐照;谷物;贮藏

Research Progress in Effects of Electron Beam Irradiation on the Storage and Quality of Grains

CHEN Xiuxia[1] *ZHANG Bin*[2*]

(1. School of Grain, Oil and Management, Guangxi Technology and Business Vocational College, Nanning 530007, China; 2. School of Food, Drug and Health Management, Guangxi Vocational and Technical College of Quality and Engineering, Nanning 530105, China)

Abstract: Conventional grain storage methods have a variety of drawbacks. Electron beam irradiation, as an emerging non-thermal processing technology, has attracted attention due to its high efficiency, environmental friendliness, and minimal impact on grain quality. The author elaborates on the principles of electron beam irradiation and its applications in the food industry, reviews its effects on harmful organisms, physicochemical properties, and sensory quality of grains during storage, and makes an outlook on its future application prospects, with the expectation of promoting the application and popularization of electron beam irradiation in food storage.

Keywords: electron beam irradiation; grain; storage

谷物是人类主要的食物来源之一,其贮藏和品质管理不仅关系到食品的供应稳定性,更关乎国家的粮食安全。我国每年在粮食贮藏、运输和加工环节损失粮食约3.5×10^{10} kg,仅在农户贮藏环节造成的粮食损失就高达8%[1]。传统的谷物贮藏方法,如自然晾晒、化学熏蒸和气调处理等,虽然在一定程度上能够延长贮藏时间,但存在害虫和微生物滋生、环境污染、能源消耗大等问题[2]。

20世纪末,联合国粮食及农业组织和世界卫生组织均对辐照食品的安全性做出了肯定,全球辐照保鲜产业加速发展[3],我国也对辐照食品制定了相关安全标准,规定食品辐照的上限剂量为10 kGy。电子束辐照(electron beam irradiation,EBI)是一种新兴的非热处理技术,因其高效、环保和对食品品质影响较小的特点,逐渐受到研究者和食品工业界的关注[4]。电子束辐照利用高能电子束穿透谷物,破坏微生物的DNA结构,从而达到杀菌和杀虫的效果,同时能够减少化学残留,提高食品安全性。此外,电子束辐照的处理时间短,且处理过程中温度升高较小,有利于保持谷物的营养成分,对于延

基金项目:2024年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2024KY1422)。

通信作者:张斌(1980—),男,硕士,高级工程师,主要从事粮食加工及储藏研究。E-mail:393148204@qq.com

收稿日期:2025-07-30 **修回日期:**2025-09-22

长谷物的贮藏时间具有重要意义。作者简要阐述了电子束辐照的原理及其在食品中的应用研究现状，分析了其对谷物贮藏期间有害生物、理化性质和感官品质的影响。该文章通过梳理现有研究成果，旨在为谷物贮藏管理提供科学依据，推动电子束辐照在谷物贮藏领域的进一步发展和应用。

1 电子束辐照概述

1.1 电子束辐照的原理

电子束辐照是一种极具发展潜力且符合环保理念的新兴绿色辐照技术，在众多领域展现出独特的应用价值。其核心在于借助电子加速器产生的低能或高能电子束射线，当这些电子束射线作用于生物细胞时，存在直接与间接2种作用方式，见图1[5]。直接作用时，电子束射线凭借其高能量的特性，能够精准地穿透生物细胞的细胞膜与细胞核膜，直接破坏细胞核内的DNA分子，进而导致微生物的正常生理功能受到严重影响，使其失去活性。间接作用时，电子束射线会与细胞内的水分子以及其他小分子物质发生相互作用，使这些分子发生辐射分解。辐射分解过程中，原本稳定的水分子等小分子物质会被分解，进而产生活性自由基，例如氢自由基（·H）、羟基自由基（·OH）等。这些活性自由基具有极高的化学活性，会在细胞内迅速扩散，并与细胞核内的各种物质发生交联反应，从而扰乱正常细胞代谢和遗传过程。通过这种直接与间接相结合的作用方式，电子束辐照所产生的辐射能量能够高效地破坏微生物的DNA结构，从而达到杀菌和杀虫的效果[3,6]。

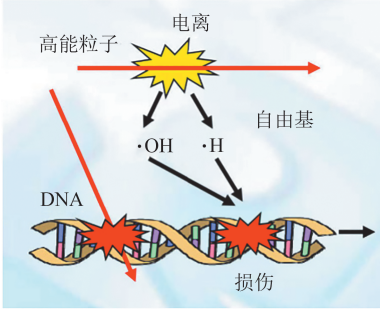


图1 电子束辐照的原理

Fig. 1 Principle of electron beam irradiation

1.2 电子束辐照在食品工业中的应用

电子束辐照在食品工业中的应用见图2。国内外研究表明，电子束辐照在减少农产品和食品损失方面成效显著，同时还能在一定程度上提升食品质量，起到包括抑菌[7]、抑制劣变[8]、延迟果蔬成熟[9]以及降解毒素[10]等方面的作用。

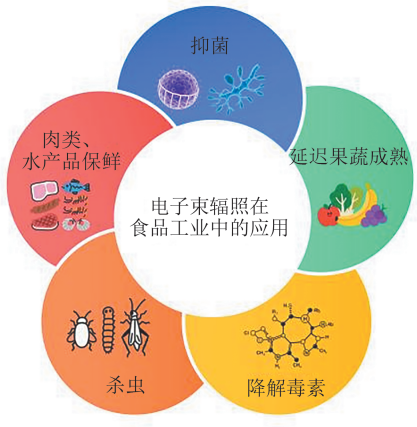


图2 电子束辐照在食品工业中的应用

Fig. 2 Application of electron beam irradiation in food industry

在果蔬保鲜方面，叶力瑕[11]研究发现，低剂量的电子束辐照处理对维持猕猴桃的贮藏品质和细胞结构具有显著效果。赵志雅等[12]用电子束辐照对枸杞、红枣、小白杏和无花果这4种新疆干果进行灭菌处理，并分析了处理前后干果的水分、总糖分、维生素C质量分数和总酸度等理化指标以及感官特性的变化，确定了4种干果的最高耐受辐照剂量分别为8、10、6、6 kGy。Zheng等[13]发现，电子束辐照可以抑制微生物生长并调节芒果的生理特性，在辐照剂量为0.35 kGy时，能够延缓水果软化，保持硬度，并降低丙二醛（MDA）的质量分数，增强细胞膜完整性。

电子束辐照在肉类和水产品保鲜方面也有一定的促进作用。瞿桂香等[14]对即食小龙虾进行辐照处理后，发现小龙虾的pH显著增加，同时虾壳的红度值和虾肉的亮度值也出现了显著差异，其颜色变得更加暗淡。Yang等[15]发现，采用低能电子束辐照联合超冷贮藏协同处理，可以显著降低真空包装猪肉的总菌落数和挥发性盐基总氮的质量分数，从而将其货架期延长至30 d。谢珂等[16]发现，以8~10 kGy剂量的高能电子束辐照处理真空包装的手撕牛肉，既可以很好地保留手撕牛肉原本的理化性质及感官品质，又可以达到安全贮藏的标准。

在肉类的嫩度方面，Wang等[17]发现，电子束辐照显著影响了新鲜鸡胸脯肉在宰后成熟过程中

的品质，可改善其嫩度。另外，电子束辐照还被应用于食品和中药材的杀菌。Lin等[18]用高能电子束辐照对新鲜湿米粉进行灭菌，发现该方法可以有效减少微生物种群并延长货架期（从1 d延长至180 d）。庄新慧等[19]用10 kGy的电子束辐照处理丹参，发现辐照前后丹参的化学成分一致性良好，微生物水平符合《中华人民共和国药典》规定，同时，辐照前后丹参内活性成分的质量分数无显著差异。王良才等[20]发现，电子束辐照能够有效杀灭黄芪中的霉菌和酵母菌，而对水分、灰分、水溶性浸出物和总黄酮的质量分数均无显著影响。

总之，电子束辐照能在保障食品安全、延长货架期的同时尽可能地维持甚至提升产品的原有品质，在食品工业的多个领域均展现出了强大的应用潜力。

2 电子束辐照对贮藏期间谷物中有害生物及真菌毒素的影响

2.1 害虫

在谷物贮藏期间，害虫是导致粮食损失和品质下降的重要因素之一。近年来，学者们将电子束辐照引入谷物贮藏领域进行应用研究，保障谷物在贮藏期间的品质和安全。研究表明，电子束辐照能够有效地控制谷物中害虫的数量。黄曼等[21]将米象、谷蠹、赤拟谷盗等主要储粮害虫混入小麦，用动态电子束辐照处理，研究发现，0.3、0.6 kGy的低剂量电子束辐照处理即可有效控制这些害虫。0.3 kGy的电子束辐照能够使3种测试害虫在4~5周内的死亡率达到100%，而0.6 kGy的电子束辐照则能在1周内使成虫的死亡率达到100%。郭东权等[22]发现，用100 Gy的电子束辐照处理磷化氢抗性品系和敏感品系的米象，18 d后这些品系的成虫全部死亡。此外，采用100 Gy的电子束辐照处理长角扁谷盗、锈赤扁谷盗和土耳其扁谷盗成虫及小麦，所有种类的成虫在18 d内全部死亡且辐照后小麦的出粉率、湿面筋的质量分数没有明显变化[23]。

2.2 微生物

谷物在收获后以及贮藏过程中可能受到微生物的影响，特别是细菌和霉菌。病原微生物及真菌所产生的真菌毒素会造成粮食大量污染，引发食品安全问题[24]。陈雪从等[25]发现，选取合适剂量的电子束进行辐照处理，可有效抑制青稞米中的细菌和真菌。在剂量为1.5 kGy时，青稞米的菌落总数和霉菌菌落数分别降低了83.75%和54.09%。魏会惠等[26]发现，用电子束辐照处理小麦粉时，霉菌、酵母菌、蜡样芽孢杆菌、需氧芽孢杆菌的辐照杀菌剂量D_{10}值（杀灭90%的微生物所需的辐照剂量）分别为2.12、2.69、2.51、2.46 kGy。潘丽红[2]用不同剂量的电子束辐照处理水分质量分数不同的稻谷，发现电子束辐照对稻谷中的微生物具有显著的杀灭效果，且电子束辐照剂量与灭菌效果呈正相关。辐照后的稻谷经过180 d贮藏后，菌落总数及霉菌菌落数的增长倍数显著低于未辐照的稻谷，即电子束辐照可抑制稻谷中微生物的生长，提高了稻谷的贮藏稳定性。Ren等[27]用不同剂量的电子束辐照处理糙米时，也发现了类似结果。Nemţanu等[28]用1.7、2.5、4.8 kGy的电子束辐照处理玉米，可分别显著抑制青霉菌属、镰刀菌属和曲霉菌属的生长。

2.3 真菌毒素

真菌毒素是特定丝状真菌在适宜的环境条件（温度、湿度等）下产生的有毒次生代谢物。谷物在贮藏过程中，如果贮藏条件不当，易导致真菌生长繁殖，产生真菌毒素。受污染的谷物中常见的真菌毒素有：黄曲霉毒素（AFs）、呕吐毒素（DON）、玉米赤霉烯酮（ZEN）、赭曲霉毒素A（OTA）和伏马菌素（FUMs）[29]。联合国粮食及农业组织的数据显示，全球超过25%的谷物不同程度地受到真菌毒素污染，每年的损失高达数十亿美元[30]。

电子束辐照可以降解谷物中的真菌毒素，保障粮食贮藏安全。罗小虎等[31]用低于15 kGy的电子束辐照处理被黄曲霉毒素污染的玉米时，发现玉米中黄曲霉毒素B_1的质量分数随着电子束辐照剂量的升高而显著降低。Li等[32]发现，电子束辐照剂量为20 kGy时，呕吐毒素在水溶液中的去除率为89.13%，显著高于在有机溶剂中的去除率。随着水分的质量分数从11.71%增加到20.03%，小米籽粒和粉末样品在20 kGy辐照剂量下的呕吐毒素去除率分别从21.86%和26.71%增加到了38.34%和51.17%。随着辐照剂量的增加，3个品种小米的营养成分和直链淀粉的质量分数保持不变。Luo等[33]用50 kGy的电子束辐照处理被玉米

赤霉烯酮和赭曲霉毒素A污染的玉米，2种真菌毒素的降解率分别为71.1%、67.9%。当电子束辐照的剂量为12 kGy时，初始质量浓度为1 μg/mL的玉米赤霉烯酮和赭曲霉毒素A在水溶液中的降解率分别达到86%、93%[34]。同样地，郭东权等[35-36]发现，玉米赤霉烯酮和赭曲霉毒素A在水溶液中的降解率均随着辐照剂量的增加而提高，当辐照剂量为5 kGy时，2种真菌毒素的降解率分别为89.11%、93.19%，且5 kGy以下剂量的电子束辐照对玉米的理化品质没有显著影响。李克等[37]发现，电子束辐照剂量为0~10 kGy时，随着辐照剂量的增加，呕吐毒素降解率逐渐升高；当电子束辐照剂量达到10 kGy时，其降解率可达89.31%。

真菌毒素污染后的谷物经电子束辐照处理后，不仅降低了真菌毒素的含量，而且提高了安全性。Yang等[38]发现，采用16 kGy的电子束辐照处理时，甲醇和乙腈中玉米赤霉烯酮的降解率分别为92.76%、72.29%，而甲醇和乙腈中赭曲霉毒素A的降解率分别为84.16%、91.56%。另外，玉米赤霉烯酮和赭曲霉毒素A污染的玉米可引起小鼠肝脏病变，用电子束辐照处理玉米可有效降低真菌毒素的肝毒性，且对玉米品质的影响较小[39]。

总的来说，电子束辐照对谷物贮藏中有害生物的控制效果显著。低剂量的电子束辐照处理就能有效杀死多种储粮害虫，显著抑制谷物中的细菌和真菌，并能有效降解被污染谷物中的多种常见真菌毒素，增强稻谷等谷物的贮藏稳定性，同时对谷物品质的影响较小。在后续研究中，有必要将控制谷物中有害生物和降低谷物品质损失的研究相结合。

3 电子束辐照对贮藏期间谷物品质的影响

谷物在贮藏过程中面临品质劣变的挑战，随着贮藏时间延长，谷物的酶活性降低、生活力减弱，理化性质随之改变，影响其加工和食用品质，进而降低其商业价值。电子束辐照是一种新兴的物理处理手段，通过高能电子束对谷物进行辐照处理，不但能够杀灭害虫与微生物，影响谷物的贮藏品质，还会对谷物的营养成分和感官品质产生影响，在一定程度上延缓谷物的品质劣变进程，进而实现延长贮藏期的目标。电子束辐照对谷物贮藏品质的影响见图3。

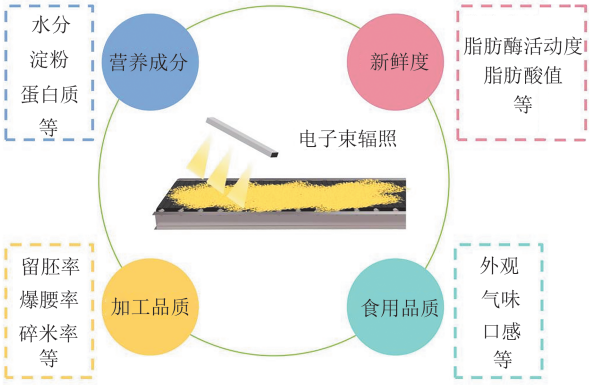


图3 电子束辐照对谷物贮藏品质的影响

Fig. 3 Effects of electron beam irradiation on storage quality of grains

3.1 营养成分

贮藏期间谷物的水分、淀粉、蛋白质等营养成分会发生改变，该变化会影响谷物的品质，而电子束辐照可以在一定程度上延缓谷物中营养成分的劣变。

3.1.1 水分

在贮藏过程中，水分含量会影响谷物中微生物的繁殖，也会影响谷物的质构特性，最终影响食用品质。电子束辐照可以改变谷物中水分含量及分布状态，进而影响其贮藏品质。Pan等[40]发现，在贮藏期内，随着贮藏时间的延长，稻谷中水分分布及水分迁移会发生变化，电子束辐照处理后，偏高水分稻谷的水分迁移受到了抑制。刘潇[41]发现电子束辐照处理可以降低稻谷贮藏过程中的水分质量分数，在高温高湿贮藏环境中，辐照和未辐照处理的稻谷，经贮藏后，其结合水的出峰时间均向后位移，且峰面积变大，这表明稻谷内结合水与大分子结合紧密度变小，而在高温低湿贮藏环境中的结果却相反。Li等[42]发现，电子束辐照处理后，高水分（17%）和低水分（13%）稻米的水分质量分数分别降低了1.03%和0.33%，浸泡30 min后用电子束辐照处理，稻米的吸水能力增强。

3.1.2 淀粉

淀粉是谷物的主要能量来源，为人和动物的生命活动提供动力，其性质影响谷物加工品质与感官品质。电子束辐照可以改变谷物中淀粉的结构，进而影响其理化性质，在一定程度上延缓谷物在贮藏期间的劣变。Ren等[27]发现，经过电子束辐照处理后，糙米中的直链淀粉的质量分数显著

下降，这可能是由于电子束辐照导致糙米中淀粉的降解，其碘结合能力降低。经过120 d的贮藏，所有糙米样品的直链淀粉质量分数均上升，但经过5 kGy的电子束辐照处理的糙米，其直链淀粉质量分数最低，这进一步表明电子束辐照在一定程度上可以延缓谷物品质的劣变。潘丽红[2]发现，低剂量的电子束辐照处理不能显著改变大米淀粉的颗粒形态；经高剂量（10 kGy）电子束辐照处理后，大米淀粉颗粒聚集，差示扫描量热仪分析结果表明，高剂量电子束辐照破坏了大米淀粉结晶区的双螺旋结构。Du等[43]发现，电子束辐照处理后的藜麦，其快消化淀粉（RDS）质量分数降低，慢消化淀粉（SDS）及抗性淀粉（RS）的质量分数均增加。当辐照剂量达到8 kGy时，藜麦淀粉的慢消化淀粉和抗性淀粉质量分数分别从9.5%和15.2%增加到16.8%和38.7%。淀粉的消化率与淀粉颗粒和酶的接触表面积及淀粉颗粒大小有关，电子束辐照能在一定程度上改变藜麦淀粉的形态，使其成为慢消化淀粉和抗性淀粉质量分数高、血糖生成指数低的理想材料。

3.1.3 蛋白质

谷物中的蛋白质是维持生命活动的必需营养素，为人体提供氨基酸，用于组织的构建与修复，它还影响谷物的营养价值与食品的加工特性。电子束辐照对蛋白质的含量影响不大，但会改变蛋白质的结构，进而改变蛋白质的理化性质。魏会惠等[26]发现，电子束辐照的剂量对小麦粉中蛋白质质量分数的影响不明显，但对面筋指数的变化影响较大。辐照剂量提高到5 kGy时，面筋指数与未辐照处理的小麦粉相比下降了6.04%，这表示电子束辐照破坏了小麦蛋白质的结构，甚至引起了蛋白质分子的降解。Chen等[44]通过傅里叶变换红外光谱和激光扫描共聚焦显微镜等方法表征了电子束辐照对青稞品质的影响，发现较高的辐照剂量（≥6 kGy）促进了蛋白质聚集，辐照后青稞蛋白质的二级结构中β折叠的相对质量分数减少，无规卷曲的相对质量分数增加。

3.2 脂肪酸值和脂肪酶活动度

在贮藏过程中，由于脂肪酶的作用，谷物中的脂肪会发生水解反应，生成游离脂肪酸。脂肪酸值是评价谷物贮藏品质的重要指标之一，其数值越高，表明谷物的脂肪酸含量越高，品质劣变越严重。谷物中的脂肪酶在脂肪分解代谢中可以调控脂肪的转化速率，直接影响谷物的贮藏稳定性[45]。赵军轻[46]研究发现，1、3、5 kGy的电子束辐照处理使小麦脂肪酶活动度降低，脂肪酸值增加。在贮藏过程中，所有小麦样品的脂肪酶活动度均先升高后降低，但在贮藏后期，辐照处理后小麦的脂肪酶活动度低于未辐照处理的小麦。辐照处理后，小麦的脂肪酸值增加速率均小于未处理的小麦，且增加速率与辐照剂量成反比。Luo等[47]发现，电子束辐照处理后，糙米中游离脂肪酸的质量分数略有增加，但在120 d的贮藏过程中，辐照处理后样品中游离脂肪酸的质量分数低于未辐照处理的样品中游离脂肪酸的质量分数。辐照处理后，糙米的脂肪酶活动度低于未辐照处理的样品，随着贮藏时间的延长，脂肪酶活动度也降低。Luo等[48]发现，在藜麦贮藏过程中，辐照处理会影响脂肪酸值的变化：前90 d内，辐照处理与未辐照处理的藜麦中游离脂肪酸的脂肪酸值均快速上升，且在第90天时两者数值接近；然而贮藏180 d后，未辐照处理的藜麦中游离脂肪酸的脂肪酸值已显著高于辐照处理的藜麦中游离脂肪酸的脂肪酸值。Tang等[49]发现，不同辐照剂量下，燕麦脂肪酶活动度有显著差异，与对照样品相比，2、6 kGy的电子束辐照处理后，燕麦的脂肪酶活动度分别降低了6.65%、23.33%。

3.3 加工品质

谷物加工品质直接决定产品品质与经济效益，低剂量电子束辐照处理对谷物加工品质的影响较小，而较高剂量可能会明显影响其品质。徐鹏程等[50]发现，与未处理的样品相比，电子束辐照处理后，留胚米的留胚率变化不大，米胚均保留完好，但白度有所降低。低剂量（<0.5 kGy）的电子束辐照处理对留胚米的爆腰率和碎米率没有显著影响，但当辐照剂量升高至1.0 kGy时，留胚米的爆腰率增加至49.20%，碎米率也增加到6.60%。Chen等[44]发现，青稞米的持水力随着电子束辐照剂量的增加而增加，在辐照剂量为6 kGy时达到峰值，从3.78 g/g增加到4.44 g/g；青稞米的持油性也得到了提高，经10 kGy处理后，青稞米的持油性从0.85 g/g提高到0.92 g/g。Niu等[51]用4种剂量（2、4、6、8 kGy）的电子束辐照对小麦粉进行预处理，与未辐照处理的小麦粉对比，辐照处理的小麦粉

的降落数值和黏度随着辐照剂量的增加而降低，湿面筋质量分数、面筋持水力、溶解度和热稳定性显著提高。将4种辐照剂量处理后的小麦粉制成面包，与未辐照处理的小麦粉制成的面包相比，贮藏7 d后，其硬度分别降低56%、51%、47%、50%。

3.4 食用品质

作为衡量谷物食品价值的关键指标，谷物的食用品质直接影响谷物的消费者接受度和市场需求。电子束辐照能够在一定程度上延缓谷物在贮藏期间的品质劣变，提升谷物的营养价值、口感和安全性，从而更好地满足消费者的需求，促进谷物产品的消费和市场流通。Yuan等[52]发现，随着电子束辐照剂量的增加，经电子束辐照处理的小米，其硬度和咀嚼性持续降低。经6 kGy辐照处理后，糯性和非糯性小米的硬度分别降低了92.58%和67.24%。电子束辐照可以使蒸煮后的小米更柔软，这可能是因为电子束辐照处理后，小米的淀粉颗粒和结构发生了变化，小米在蒸煮过程中吸收更多水分，所以蒸煮后的硬度降低。徐鹏程等[50]发现，低剂量的电子束辐照处理对留胚米的理化指标和食用品质影响较小，在25 ℃下贮藏120 d的过程中，留胚米的感官品质下降，未辐照以及0.5、1.0 kGy的电子束辐照处理的样品，其综合评分从77.7、73.8、70.2分别降至70.6、69.9、68.0。Zhai等[53]发现，电子束辐照处理后的高水分稻米（HMR）的感官品质随着辐照剂量的增加而降低。与未辐照处理的HMR相比，1、2 kGy的电子束辐照处理的HMR的风味变化不明显，仍呈现出淡淡的香味和甜味。贮藏180 d后，HMR的口感和外观变化不大，而风味和适口性变化较大。未辐照处理的HMR在贮藏后风味值变化不明显，而辐照处理的HMR在贮藏后期风味值有所增加，在辐照剂量为1 kGy和2 kGy时，其风味值分别由9.2分和9.2分增加到12.5分和11.9分。

适当的电子束辐照处理对谷物的水分含量和蛋白质含量无显著影响，同时可以降低脂肪酶活动度和脂肪酸值，改善谷物贮藏品质，但可能会改变淀粉和蛋白质的结构，影响谷物口感。总体而言，电子束辐照作用于谷物时，对谷物营养品质产生的影响呈现出多维且复杂的特点。从营养层面来看，它可能会改变食品中特定营养物质的含量及稳定性。若能精准调控辐照条件，电子束辐照可成为保障谷物贮藏稳定性和安全性的有效手段。未来将电子束辐照应用于谷物贮藏时，必须综合权衡食品的类别属性、辐照剂量，以及消费者对于食品营养的个性化需求等要素。

4 展望

在全球粮食需求攀升与人们对食品安全、品质要求日益严格的背景下，电子束辐照在谷物贮藏领域展现出巨大潜力。从技术优势来看，电子束辐照具有高效、精准且无化学残留的优势，能够有效解决传统谷物贮藏方法中存在的化学药剂残留、微生物抗药性增强以及处理时间长等问题。未来，随着电子束辐照设备和技术的不断升级，其能量利用率将进一步提高，处理效率也将大幅提升，有望实现大规模、连续化的谷物辐照处理，以满足不断增长的粮食贮藏需求。在食品安全保障方面，电子束辐照能够有效杀灭谷物中的各类害虫、微生物（包括霉菌、细菌等），且能抑制谷物发芽、减少真菌毒素的产生，从而显著降低谷物在贮藏过程中的质量损失和安全风险，这一特性使得电子束辐照在保障消费者健康、提升粮食安全水平方面具有不可替代的作用，符合当前社会对食品安全高度关注的趋势。从经济角度看，电子束辐照虽然初期投资较高，但其长期经济效益显著，主要体现在能减少化学药剂使用、降低粮食损失及延长粮食贮藏期等方面。而且，随着技术普及和规模化应用，设备成本有望降低，这会推动电子束辐照在谷物贮藏领域的广泛应用。同时，电子束辐照环境友好，不会产生有害气体，对操作人员和环境无危害，契合绿色、低碳、环保的发展理念。在全球倡导可持续发展的趋势下，这一优势使其更具竞争力。

综上所述，电子束辐照在谷物贮藏中的前景光明。未来，随着技术进步和应用研究的深入，它将在保障粮食安全、提升经济效益、促进环境保护等方面发挥重要作用，为谷物贮藏行业带来新的机遇与变革。

参考文献

[1] 刘如楠. 好一个保鲜节能的储粮“大冰箱”![N]. 中国科学报，2021-06-08(3).

[2] 潘丽红. 电子束辐照对偏高水分稻谷储藏品质及淀粉性质的影响[D]. 无锡：江南大学，2021.

[3] HOU D H，WANG C L，YU J T，et al. Effects of electron beam irradiation on the postharvest quality characteristics of winter jujube（*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dalidongzao）[J]. Journal of Future Foods，2025，5（2）：153-161

[4] TIAN M M，WANG Y，SUN H J，et al. Effect of electron beam irradiation pretreatment on the structural，physicochemical properties of potato starch-fatty acid complexes and the proliferation of *Bifidobacterium adolescentis* [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，282：137258.

[5] LIANG D Y，LUO L，LUO H Y，et al. Differentiation of electron beam and X-ray irradiation modified starch under vacuum conditions：multi-scale structure and properties[J]. LWT-Food Science and Technology，2024，211：116840.

[6] 燕欣悦，胡风庆，宁崇，等. 电子束辐照技术对食品品质的影响及在食品中的应用研究进展[J]. 食品与机械，2025，41（2）：216-225.
YAN X Y，HU F Q，NING C，et al. Research progress on the effect of electron beam irradiation technology on food quality and its application in food[J]. Food & Machinery，2025，41（2）：216-225.（in Chinese）

[7] FERREIRA C D，LANG G H，LINDEMANN I D S，et al. Postharvest UV-C irradiation for fungal control and reduction of mycotoxins in brown，black，and red rice during long-term storage[J]. Food Chemistry，2021，339：127810.

[8] 刘雅慧，杨菁菁，左都文，等. 电子束辐照对板栗发芽的抑制效果及对板栗品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报，2024，15（7）：276-282.
LIU Y H，YANG J J，ZUO D W，et al. Effects of electron beam irradiation on chestnut sprout inhibition and its quality [J]. Journal of Food Safety & Quality，2024，15（7）：276-282.（in Chinese）

[9] YE L X，NIU Y X，YU J T，et al. Application of electron beam irradiation in kiwifruit preservation and construction of a predictive model for its effectiveness[J]. Journal of Stored Products Research，2025，114：102723.

[10] WANG Y，WANG D，LI C J，et al. Effects of high-energy electron rays on groundnut cake：kinetics of aflatoxins degradation and changes in physicochemical quality[J]. Food Control，2024，166：110709.

[11] 叶力瑕. 电子束与X射线辐照对猕猴桃品质和电学特性的影响[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2024.

[12] 赵志雅，左都文，李乐，等. 电子束辐照对新疆干果品质的影响及其最高耐受剂量的确定[J]. 食品安全质量检测学报，2023，14（10）：270-277.
ZHAO Z Y，ZUO D W，LI L，et al. Effects of electron beam irradiation on quality of Xinjiang dried fruit and determination of its maximum tolerated dose[J]. Journal of Food Safety & Quality，2023，14（10）：270-277.（in Chinese）

[13] ZHENG B，SHAHZAIB M，MI Z Q，et al. Electron beam irradiation significantly improves post-harvest fruit quality and shelf-life of mango（*Mangifera indica* L.）[J]. Postharvest Biology and Technology，2025，228：113647.

[14] 瞿桂香，马文慧，钱文霞，等. 不同剂量电子束辐照即食小龙虾的品质分析[J]. 食品科技，2020，45（10）：155-161.
QU G X，MA W H，QIAN W X，et al. Quality changes of instant crayfish irradiated by different electron-beam[J]. Food Science and Technology，2020，45（10）：155-161.（in Chinese）

[15] YANG J，ZHANG Y J，SHI H，et al. Influence of low-energy electron beam irradiation on the quality and shelf-life of vacuum-packaged pork stored under chilled and superchilled conditions [J]. Meat Science，2023，195：109019.

[16] 谢珂，高鹏，何梁渠，等. 电子束辐照对手撕牛肉贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发，2023，44（5）：62-67.
XIE K，GAO P，HE L Q，et al. Effect of high-energy electron beam on storage quality of shredded beef[J]. Food Research and Development，2023，44（5）：62-67.（in Chinese）

[17] WANG X，WANG L Y，YU J T，et al. Effect of electron beam irradiation on the quality of chicken during post-mortem ageing [J]. Food Chemistry，2025，480：143869.

[18] LIN L，LI D Y，ZHANG D H，et al. Reduction of microorganisms in fresh wet rice vermicelli food by irradiation technology [J]. High Energy Chemistry，2025，59（3）：257-264.

[19] 庄新慧，于敏，王君淑，等. 丹参电子束辐照杀菌安全剂量的确定及质量评价[J]. 核农学报，2025，39（2）：285-296.
ZHUANG X H，YU M，WANG J S，et al. Determination of safe dose and quality evaluation for sterilization of *Salvia miltiorrhiza* by electron beam irradiation [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2025，39（2）：285-296.（in Chinese）

[20] 王良才，王海军，刘秉坤，等. 高能电子束辐照灭菌对黄芪品质的影响[J]. 核农学报，2025，39（5）：953-960.
WANG L C，WANG H J，LIU B K，et al. Effects of high energy electron beam irradiation sterilization on quality of *Astragali Radix* [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2025，39（5）：953-960.（in Chinese）

[21] 黄曼，胡碧君，罗柏流，等. 电子束辐照防治储粮害虫及对小麦品质影响的研究[J]. 河南工业大学学报（自然科学版），2009，30（4）：17-20.
HUANG M，HU B J，LUO B L，et al. Effects of electron beam irradiation on pest-control and wheat quality analysis in bulk grain storage[J]. Journal of Henan University of Technology（Natural Science Edition），2009，30（4）：17-20.（in Chinese）

[22] 郭东权，范家霖，张建伟，等. 电子束辐照防治不同品系米象成虫及对大米蒸煮品质的影响[J]. 粮食储藏，2014，43（6）：1-6.
GUO D Q，FAN J L，ZHANG J W，et al. Effects of electronic beam irradiation on phosphine resistant and susceptible of *Sitophilus oryzae* Linnaeus and cooking quality of rice[J]. Grain Storage，2014，43（6）：1-6.（in Chinese）

[23] 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.
GUO D Q，WANG Z Y，LU Y J，et al. Effects of electronic beam irradiation on Cucujidae insects-control and the qualities of wheat[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2016，31（2）：98-102.（in Chinese）

[24] 张咚咚，李梦瑶，王子祎，等. 纳米材料在粮食安全储藏中的应用[J]. 粮食储藏，2024，53（3）：27-36，76.
ZHANG D D，LI M Y，WANG Z Y，et al. The application of nanomaterials in grain security storage[J]. Grain Storage，2024，53（3）：27-36，76.（in Chinese）

[25] 陈雪从，杨希娟，张文刚，等. 电子束辐照对青稞米理化性质及食用品质的影响[J]. 粮油食品科技，2024，32（6）：143-150.
CHEN X C，YANG X J，ZHANG W G，et al. Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible quality of highland barley rice[J]. Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2024，32（6）：143-150.（in Chinese）

[26] 魏会惠，罗小虎，王莉，等. 电子束辐照小麦粉的杀菌效果及对低菌小麦粉品质的影响[J]. 现代食品科技，2017，33（2）：142-147.
WEI H H，LUO X H，WANG L，et al. Effect of electron beam irradiation on the sterilization，quality，and bacterial count of wheat flour[J]. Modern Food Science and Technology，2017，33（2）：142-147.（in Chinese）

[27] REN B，ZHAI Y H，WAN Y，et al. Influence of electron beam irradiation on storage stability and sensory properties of brown rice[J]. Journal of Cereal Science，2025，121：104102.

[28] NEMŢANU M R，BRAŞOVEANU M，KARACA G，et al. Inactivation effect of electron beam irradiation on fungal load of naturally contaminated maize seeds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture，2014，94（13）：2668-2673.

[29] SCHAARSCHMIDT S，FAUHL-HASSEK C. The fate of mycotoxins during secondary food processing of maize for human consumption[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety，2021，20（1）：91-148.

[30] GAVAHIAN M，PALLARES N，KHAWLI F A，et al. Recent advances in the application of innovative food processing technologies for mycotoxins and pesticide reduction in foods[J]. Trends in Food Science & Technology，2020，106：209-218.

[31] 罗小虎，齐丽君，房文苗，等. 电子束辐照降解玉米中黄曲霉毒素 B_1 及对玉米品质的影响[J]. 食品与机械，2016，32（10）：111-114，193.
LUO X H，QI L J，FANG W M，et al. Effects of electron beam irradiation on the degradation of aflatoxins and the physicochemical properties of corn[J]. Food & Machinery，2016，32（10）：111-114，193.（in Chinese）

[32] LI M，HE S S，YANG S F，et al. Deoxynivalenol removal and quality evaluation of foxtail millet under electron beam irradiation[J]. Food Control，2025，174：111245.

[33] LUO X H，QI L J，LIU Y T，et al. Effects of electron beam irradiation on zearalenone and ochratoxin a in naturally contaminated corn and corn quality parameters[J]. Toxins，2017，9（3）：84.

[34] 罗小虎，李克，王韧，等. 臭氧、电子束辐照降解玉米赤霉烯酮和赭曲霉毒素A[J]. 食品与机械，2017，33（12）：98-102，173.
LUO X H，LI K，WANG R，et al. Study of ozone and electron beam irradiation on degradation of zearalenone and ochratoxin A[J]. Food & Machinery，2017，33（12）：98-102，173.（in Chinese）

[35] 郭东权，王娴，董威杰，等. 电子束辐照对玉米品质及赭曲霉毒素A降解效果的探讨[J]. 中国粮油学报，2018，33（5）：76-81.
GUO D Q，WANG X，DONG W J，et al. Effects of electron beam irradiation on corn quality and degradation of ochratoxin A[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2018，33（5）：76-81.（in Chinese）

[36] 郭东权，王娴，许勃，等. 电子束辐照对玉米赤霉烯酮的降解效果及玉米品质的影响[J]. 粮食与饲料工业，2019（1）：11-14.
GUO D Q，WANG X，XU B，et al. Effect of electronic beam irradiation on degradation of zearalenone and the

qualities of maize[J]. Cereal & Feed Industry，2019(1)：11-14.(in Chinese)

[37] 李克，潘丽红，罗小虎，等. 电子束辐照降解玉米中玉米赤霉烯酮和呕吐毒素[J]. 食品与发酵工业，2019，45(21)：73-78.
LI K，PAN L，LUO X，et al. Degradation of zearalenone and deoxynivalenol in corn by electron beam irradiation [J]. Food and Fermentation Industries，2019，45(21)：73-78 .(in Chinese)

[38] YANG K，LI K，PAN L H，et al. Effect of ozone and electron beam irradiation on degradation of zearalenone and ochratoxin A[J]. Toxins，2020，12(2)：138.

[39] LUO X H，ZHAI Y H，QI L J，et al. Influences of electron beam irradiation on the physical and chemical properties of zearalenone- and ochratoxin A-contaminated corn and *in vivo* toxicity assessment[J]. Foods，2020，9(3)：376.

[40] PAN L H，XING J L，LUO X H，et al. Influence of electron beam irradiation on the moisture and properties of freshly harvested and sun-dried rice[J]. Foods，2020，9(9)：1139.

[41] 刘潇. 高温胁迫下电子束辐照对储藏籼稻脂质变化规律的影响机制研究[D]. 南京：南京财经大学，2023.

[42] LI D M，WAN Y，ZHANG J Y，et al. Effect of electron beam irradiation on edible quality maintenance of high moisture rice grains[J]. Journal of Cereal Science，2025，121：104104.

[43] DU Z H，LI Y L，LUO X H，et al. Effects of electron beam irradiation on the physicochemical properties of quinoa and starch microstructure [J]. Starch，2020，72(11/12)：1900178.

[44] CHEN X C，KUANG J W，WU J，et al. Effects of electron beam irradiation on structural，physicochemical，and functional properties of highland barley rice [J]. International Journal of Food Science and Technology，2025，60(1)：vvaf026.

[45] LI X，FARID M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies [J]. Journal of Food Engineering，2016，182：33-45.

[46] 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.

[47] LUO X H，LI Y L，YANG D，et al. Effects of electron beam irradiation on storability of brown and milled rice[J]. Journal of Stored Products Research，2019，81：22-30.

[48] LUO X H，DU Z H，YANG K，et al. Effect of electron beam irradiation on phytochemical composition，lipase activity and fatty acid of quinoa[J]. Journal of Cereal Science，2021，98：103161.

[49] TANG Y，XU L，YU Z Y，et al. Influence of 10 MeV electron beam irradiation on the lipid stability of oat and barley during storage[J]. Food Chemistry：X，2023，20：100904.

[50] 徐鹏程，王苳玮，罗小虎，等. 电子束辐照对留胚米理化性质及食用品质的影响[J]. 食品与生物技术学报，2023，42(4)：41-47.
XU P C，WANG J W，LUO X H，et al. Effect of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible qualities of rice with remained germ[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2023，42(4)：41-47.(in Chinese)

[51] NIU L，YAN M T，LIANG W，et al. Effect of electron beam pretreated wheat flour on dough properties [J]. Journal of Cereal Science，2024，120：104031.

[52] YUAN Q Y，YANG M，YUE X F，et al. Effects of electron beam irradiation on cooking quality and volatile components of waxy and non-waxy proso millet (*Panicum miliaceum* L.)[J]. Journal of Cereal Science，2024，119：103997.

[53] ZHAI Y H，PAN L H，LUO X H，et al. Effect of electron beam irradiation on storage，moisture and eating properties of high-moisture rice during storage [J]. Journal of Cereal Science，2022，103：103407.

（责任编辑：金文苑）