

辐照技术对食源性病原菌的影响研究

许佳¹, 肖欢², 焦新安^{1,3}, 黄金林^{1,3*}

(1. 扬州大学, 江苏省人兽共患病学重点实验室, 扬州 225009; 2. 扬州辐照中心, 扬州 225009;
3. 江苏省动物重要疫病与人兽共患病防控协同创新中心, 扬州 225009)

摘要: 食源性病原菌, 指在食品加工和流通过程中引入的病原菌, 是引发食源性疾病的重要因素。这些病原菌以食品作为载体进行传播, 一定程度上增加了某些食源性疾病爆发的可能, 而传统的控制措施抑菌效果有限, 当务之急是寻求革新的食品杀菌技术。食品辐照技术作为一种高新的冷杀菌技术, 具有安全、无污染等优点, 近年来在保障食品质量安全方面发挥的作用也引起了社会的高度重视, 关于辐照技术对食品中病原菌致死作用的系统描述相对较少。本文结合国内外关于食品辐照灭菌的研究报道, 综述了辐照技术的发展、辐照技术控制食品病原菌进展、辐照杀菌机制以及影响辐照灭菌效果的主要因素, 并对该技术存在的问题和未来的研究进行了探讨, 以期为进一步预防和控制食源性疾病提供新的思路。

关键词: 食源性病原菌; 辐照灭菌; 食品安全

Study on the effect of irradiation technology on foodborne pathogens

XU Jia¹, XIAO Huan², JIAO Xin-An^{1,3}, HUANG Jin-Lin^{1,3*}

(1. Key Laboratory of Zoonoses of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Yangzhou Irradiation Center, Yangzhou 225009, China; 3. Jiangsu Co-Innovation Center for Prevention and Control of Important Animal Infectious Diseases and Zoonoses, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

ABSTRACT: Foodborne pathogens, which are introduced into food processing and circulation, are important factors contributing to foodborne diseases. These pathogens spread through food circulation, to some extent, it increases the possibility of some foodborne disease outbreaks. The traditional control measures have limited bacteriostasis effect and the urgent task is to seek innovative food sterilization technology. As a new technology of cold sterilization, irradiation has the advantages of safety and non pollution, which has attracted much attention in ensuring food quality and safety in recent years. The systematic description of the lethal effect of irradiation technology on the pathogenic bacteria in food is less. This article combined domestic and international research reports on food irradiation sterilization, summarized the development of irradiation technology, the research progress on irradiation prevention and control of foodborne pathogens, radiation sterilization mechanism and the main factors influencing the sterilization effect of irradiation and discussed the problems and future research of the technology, in order to provide new thought for further prevention and control of foodborne diseases.

KEY WORDS: foodborne pathogens; irradiation sterilization; food safety

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0500500)、2017年江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2017341)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD0500500) and Key Research and Development Program (Modern Agriculture) Project of Jiangsu Province (BE2017341)

***通讯作者:** 黄金林, 教授, 主要研究方向为人兽共患病原菌的研究。E-mail: jinlin@yzu.edu.cn

***Corresponding author:** HUANG Jin-Lin, Professor, Key Laboratory of Zoonoses of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China. E-mail: jinlin@yzu.edu.cn

1 引言

社会工业化发展的负面影响,导致食源性疾病事件的发生概率不断增高,食源性疾病逐渐成为世界上最广泛的公共卫生问题之一^[1]。食源性病原菌存活于食物中,其生长代谢可导致食品腐败变质,从而引发食物中毒。目前,已有200多种病原体能导致人患病,轻者常引起腹痛、腹泻等胃肠道疾病,免疫力低下者还会出现肝炎、骨髓炎甚至神经系统疾病等并发症^[2]。据统计,在发达国家,每年约30%的人会感染食源性病原菌^[3]。常见的能引起人食物中毒的病原菌主要有金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、大肠杆菌、志贺氏菌,另外,单核增生李斯特菌、空肠弯曲菌等也对人类健康造成了严重威胁^[4-7]。

传统的食品保藏技术主要依靠物理、生物化学方法。其中,低温冷冻、真空包装是较常用的物理储存方式,但低温并不能完全阻止食源性病原菌的生长^[8]。而生物化学方法存在使用规范等诸多限制,且抑菌效果有限,又存在药物残留等缺点。革新的食品保鲜贮藏技术要求既能确保食品的营养品质、矿质成分,杜绝防腐剂,又能简化加工程序,无热力操作^[9]。目前认同的替代技术主要有臭氧^[10]、噬菌体^[11]、辐照^[12]、对抗性细菌^[13]等,因食品辐照技术安全无毒,更易操作等特点,被认为是较理想的选择。

本文主要综述了辐照技术在控制食源性病原菌方面的研究进展,以期为进一步控制食源性疾病提供新的思路。

2 辐照技术的发展

辐照技术作为食品工业中的绿色高新技术,属于冷加工技术。其利用放射性同位素(⁶⁰Co、¹³⁷Cs等)产生的 γ 射线,或加速器产生的10 MeV以下的高能电子束,对食品和农副产品进行加工处理。

该技术可追溯至1895年,物理学家伦琴发现了X射线,继而发现其对微生物有灭活作用^[14]。之后核物理飞速发展,1904年英国公开了第一项 γ 射线杀菌专利。经过许多国家的科技工作者对原子能的积极探索, γ 辐照灭菌逐渐成为保藏食品的一种重要手段。而对于辐照食品的安全性问题,国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)、联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)三大权威机构,组织了相关人员对辐照食品安全性进行了深入的研究,并在1976年提出:食品辐照过程属于物理过程,应与化学添加剂和污染区别开来,没有“每日摄入量”和“安全系数”的问题^[15]。1983年,世界卫生组织声明辐照食品是安全的,不存在毒理学、营养学和微生物学上的任何问题。食品辐照技术由于不使用化学物质,加工后的食品中不会有任何残留,更不会对环境造成危害。

基于科学研究,辐照技术便开始大幅兴起。目前,世

界范围内已有53个国家和地区批准500多种食品可以进行辐照处理,其中30多个国家进入到大规模的商业生产阶段,每年辐照加工量已超30万吨。总的来说,食品辐照加工作为一种新兴产业,产量每年都在增长。我国建成一定规模的辐照装置已有100余座,用于食品、药材、医疗产品等的灭菌,在一定程度上为我国国民经济作出了相当大的贡献^[16]。

3 辐照技术控制食品病原菌进展

在食品加工和流通过程中,不卫生的环境、不规范的操作等都将造成细菌污染。沙门氏菌等食源性病原菌一旦进入人的食物链又会导致人类感染或食物中毒,据报道,超过90%的病例是因为食用了被细菌污染的食品所致^[17-19]。

据文献报道,2~4 kGy的辐照剂量能够有效降低新鲜蔬果中食源性病原菌的污染水平,抑制发芽,延长食品的货架期,一定程度上减少了食源性疾病的发生^[20]。Kundu等^[21]用1 kGy的电子束辐照新鲜牛肉,其表面的大肠杆菌、沙门氏菌等被有效杀灭。Chen等^[22]对辣子鸡丁进行了不同剂量的辐照,结果显示10 kGy的剂量有效地降低了病原菌水平,而没有影响其感官品质和蛋白质含量。类似的研究说明中低剂量的辐照技术对抑制食品中病原菌的作用显著。

Li等^[23]结合乳酸对新鲜牛肉进行低剂量照射,发现5%的乳酸预处理联合1 kGy的辐射处理能使其中沙门氏菌的灭活效率多增1.8 logCFU/g,抑菌效果显著。Ha等^[24]发现UV-C辐射结合气调包装能够有效杀灭切片奶酪中的食源性病原菌,与对照组相比,使用聚丙烯或聚乙烯薄膜包装的奶酪获得了最佳的辐照效果。进一步说明,辐照结合其他抑菌手段对提高杀菌率,降低辐照剂量具有重要意义。

Jeong等^[25]研究了 γ 射线和电子束辐照对烤面包中病原菌(大肠杆菌、单核增生李斯特菌等)的影响,发现两者均能产生明显的抑菌效果,同时不会影响食品的感官风味。Lacivita等^[26]发现适宜的UV-C辐射(6.0 kJ/m²)能有效杀灭奶酪表面的细菌,延长其货架期。鉴于辐照处理能够显著降低食品中的致病菌数量,一些欧洲国家已将⁶⁰Co产生的 γ 射线或X射线用于实际生产灭菌。美国FDA(Food and Drug Administration, FDA)和USDA(United States Department of Agriculture, USDA)规定^[27],为控制如弯曲菌等的细菌,其最大辐射量为3 kGy,而在这个剂量下,并不会影响到食品的感官品质。因此,电离辐射技术降低食品中病原菌的显著效率决定了其在控制世界性食源性疾病爆发中的特殊地位。

4 辐照对食源性病原菌的作用机制

食品辐照技术是一种物理加工手段,利用射线对食品进行照射,引起食品及食品中的微生物、昆虫等发生一系列物理、化学与生物化学变化,使得微生物的生长发育、新陈代谢等受到抑制甚至破坏,抑制发芽、杀虫、灭菌、

保持食品卫生, 以达到延长货架期、减少损失、保存食品目的的一种技术^[28]。

4.1 致使 DNA 损伤

辐射对病原微生物的直接效应指微生物接受辐射后, 其生物大分子发生一定程度的电离、损伤和断裂, 进而导致微生物死亡^[29,30]。电离辐射产生的高能光子或者自由基可以打断 DNA 链。Hahn 等^[31]研究发现, 与真空条件下的水合 DNA 相比, 经 30 keV 电子照射的 DNA 质粒出现了更多的双链断裂。电离辐射可能导致的 DNA 变化: DNA 中联结糖与磷酸基之间的键断裂(单链断裂); 联结 A、T、C、G 之间的氢键发生断裂(双链断裂); DNA 链形成交联; 碱基发生分解和游离。然而实际上 DNA 受损伤的程度一般取决于辐射期间 DNA 链的状态。一旦损伤 DNA, 如果没有及时地修复, 细胞便会失去其复制能力。

4.2 致使蛋白质变性

蛋白质是生命活动的主要承担者, 在生物体中起催化、调节、转运、贮存等作用。微生物的许多生命活动也均由酶来催化, 而酶的成分多是蛋白质。Bosshard 等^[32]通过免疫印迹和蛋白质组学研究了辐照对大肠杆菌的作用, 结果显示细胞的蛋白质羧基化严重, 转录、翻译等功能受到影响。辐照对蛋白质的作用机制相对复杂, 而不同种类的蛋白质对辐照的敏感性及反应也不尽相同。辐照一般通过使蛋白质分子发生脱氨、脱羧、氨基酸氧化、二硫键断裂或重建、肽链的降解或交联等一系列反应, 使蛋白质的空间结构及蛋白分子间的聚集方式发生变化^[33], 从而改变了蛋白质的功能特征, 这些结构和功能的变化可能与辐照产生的自由基有关, 且侧链是蛋白质分子中较为敏感的部分, 含硫的氨基酸和环结构化合物是对辐射最敏感的部分。

4.3 致使 RNA 氧化损伤

电离辐射作为一种基因毒物质, 可导致 DNA 链断裂并产生活性氧自由基(reactive oxygen species, ROS)。ROS 很容易接近并损伤细胞质内的 RNA, 进而引发一系列的细胞生物学反应, 如影响 RNA 对基因表达的调控功能、改变 RNA 的结构和催化活性、降低甚至阻断某些蛋白质的翻译等^[34-39], 这些可在几分钟内完成, 导致细胞内积累些由受损伤 RNA 翻译的错误蛋白质, 产生细胞毒性, 从而对细胞的正常生长和分化产生影响。虽然电离辐射对 RNA 的损伤还未有较系统的研究报告, 在这一领域也尚有许多未解决的问题, 所幸马春花^[40]的研究指出在经过照射后的细胞中检测到了不同程度的 RNA 氧化损伤, 发现随着辐照剂量的增加, RNA 损伤更加严重, 表明辐射能造成 RNA 氧化损伤并与辐照剂量呈正相关。

4.4 致使细胞膜受损

根据电离辐射理论, 微生物经过照射之后会发生原始的生化损伤, 新陈代谢的方向性和协调性遭到破坏, 引起一系列的生理和病理变化。经研究表明^[41], 辐照导致细

胞膜的渗透性和完整性发生了改变, 微生物体细胞的超微结构产生变化, 且其形态结构变化与辐照剂量相关。低剂量的照射使得细胞细胞壁和细胞膜发生损伤, 细胞质存在破碎现象。高剂量下细胞的形态结构会发生显著变化, 出现严重的质壁分离现象, 甚至变为空泡。

5 影响辐照的因素

微生物对辐照的敏感性或抗性主要取决于细胞在照射期间的生理生化特性, 但在辐照时也会受外部环境的影响^[42], 以下几种因素均能在一定程度上对微生物的辐射敏感性产生影响。

5.1 微生物的种类

一般而言, 微生物较高等生物细胞更耐辐射。研究表明, 辐射敏感性与个体的大小不存在直接关系。不同种属、不同品系的微生物具有不同的辐射敏感性。另外, 照射条件也会对其辐射敏感性造成一定的影响。虽然生物体对辐射的抗性与其大小不成对应关系, 但就一般而言^[43], 病毒比细菌孢子更耐辐射, 而细菌孢子又比植物细胞、霉菌、酵母菌等具有更强的抗性。

5.2 氧气

氧气的存在增强了辐照对微生物的杀灭作用。经研究, 微生物在厌氧条件下对辐射的抗性通常会增加 2 到 5 倍。短小芽孢杆菌的孢子在有氧环境下测得的 D_{10} 值为 1.75 kGy, 而其在厌氧条件下的 D_{10} 值则是 3.06 kGy^[44]。这是由于在辐照过程中, 氧气可能会与 e^- 和 H 反应, 产生过氧化物或超氧自由基(HO_2^{\cdot}), 从而对细胞造成进一步的损伤。

5.3 湿度或水分含量

如果机体的水分充足, 可引发辐照的间接效应。因为水分经过照射, 会产生更多的自由基。水含量对微生物辐射敏感性的影响是与氧气协同作用的。氧气的存在有助于增强辐射, 氧与水电离产生的 H 和 e^- 反应能生成 HO_2^{\cdot} 和 H_2O_2 等过氧化物, 或与游离的机体自由基反应产生 RO_2^{\cdot} , 导致更多的辐射损伤。自由基的形成增强了电离辐射对生物体的致死作用。根据一项研究显示, 宠物食品中含水量越大, 沙门氏菌越容易被杀死, 辐照后剩余的菌越少^[45]。当微生物生长环境中水分含量较低时, 其自身代谢反应有所减弱, 菌体进入休眠状态; 而水分含量较多时, 导致某些无机盐溶出, 菌体处于较活跃的状态, 辐照易杀死。

5.4 温度

据报道, 辐照温度每上升 $10^{\circ}C$, 微生物的 D_{10} 值便会下降 50%^[46]。在一定条件下, 热处理与辐照结合使用的效果常比单用热处理或辐照处理的更好。辐照前一定的热处理能增强真菌孢子对射线的敏感性。

辐照结合冷冻处理肉毒梭菌的孢子, 能明显增强其辐射抗性。这是由于水电离产生的自由基活性被抑制, 从而减弱了辐照的间接效应。经研究, 鼠伤寒沙门氏菌在低

温条件下进行照射,其辐射抗性增强了1.5倍^[47]。这种低温保护作用在其他生物体中同样可见。一般而言,辐射结合热处理能够降低杀灭致病菌所需的剂量,提高效果,还能减少辐照给食品带来的不良影响。

5.5 辐照与其他方法结合

辐照结合其他抑菌方法一定程度上提高了杀菌效率,还可以降低辐照损伤率。辐照与化学防腐剂、食品添加剂以及气调包装等的协同效应能够有效地控制食源性病原菌,延长食品的贮藏期,保障食品的质量和卫生安全。一项关于辐照结合高氧封装处理菠菜幼苗叶的研究证实,采用组合辐照处理的方法能有效降低辐照食品所需的剂量,也避免了高剂量辐射对食品品质的影响^[48]。

6 辐照存在的主要问题和展望

伴随着辐照技术的发展应用,其安全问题受到一定争议,虽然经过许多年的探索研究,人们对于辐照食品是否安全依然存疑。早期对辐照食品安全的质疑因科学研究的深入而被否定。就是最近比较关注的辐照副产物2-烷基环丁酮^[49],也通过详尽的动物毒理实验以及权威食品机构的认证,证实了它不具有毒理学上的危害。

而辐照食品能否达到相应的贮藏要求则与辐照剂量有关。依据大量微生物学、毒理学和营养学方面的试验,早在1999年FAO、IAEA、WHO就明文规定了以10 kGy剂量作为食品辐照的国际安全线^[50]。美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)、IAEA等出台的法规也详述了辐照类型(γ 射线、电子束和X射线)、能量(电子束为10 MeV)和剂量。然而,之后的实验研究证明, γ 射线有效杀灭细菌的吸收剂量为0.5~50 kGy,灭除病毒和孢子所需剂量为10~50 kGy,大面积消除孢子的剂量则高达50 kGy。低剂量的照射并不能解决包括芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、肉毒杆菌等引起的食物中毒问题,但为了灭除病毒和孢子的高剂量(>10 kGy)在一定程度上会破坏食品的结构性能,影响质感^[51]。因此,寻找既能达到灭菌效果又不影响食品感官品质的安全方法是目前食品辐照技术仍需探索的领域。未来的研究建议致力于辐照技术与食品添加剂(如天然抗氧化剂、调味剂等)、气调包装等的协同效应。

微生物对辐射的抗性也是影响辐照灭菌效果的重要因素,或许因为孢子与病毒的体型微小,低剂量辐射很难准确无误地作用于其致命位点,而需提高辐照剂量才行。为解决这一问题,进一步的研究应着重于积累各种病原菌对辐射敏感的情况,探究影响辐照的因素和机制,采用与其他方法组合的处理手段,降低辐照剂量,并为不同种类食品辐照摸索最佳剂量,优化工艺程序,规范操作。

参考文献

[1] Karus A, Ceciliani F, Bonastre AS, et al. Development of simple multiplex real-time PCR assays for foodborne pathogens detection and identification

on lightcycler [J]. Maced Veter Rev, 2017, 40(1): 53–58.

- [2] Scallan E, Hoekstra RM, Mahon BE, et al. An assessment of the human health impact of seven leading foodborne pathogens in the United States using disability adjusted life years [J]. Epidemiol Infect, 2015, 143(13): 2795–2804.
- [3] Hamad GM, Zeitoun AM, Abu-Serie MM, et al. Detection and control of foodborne pathogenic bacteria using solanum nigrum extract as antibacterial in meat products [J]. Annu Res Rev Biolo, 2018, 23(6): 1–17.
- [4] Ranjbar R, Rahmati H, Shokoohizadeh L. Detection of common clones of *Salmonella enterica* serotype Infantis from human sources in Tehran hospitals [J]. Gastroenterol Hepatol Bed Bench, 2018, 11(1): 54–59.
- [5] Quan J, Zhao D, Liu L, et al. High prevalence of ESBL-producing *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* in community-onset bloodstream infections in China [J]. J Antimicrob Chemother, 2017, 72(1): 273–280.
- [6] Weiler N, Orrego M, Alvarez M, et al. First results of the comprehensive surveillance of the antimicrobial resistance of foodborne pathogens, *Campylobacter* spp. and *Salmonella* spp. in three different populations. Paraguay, 2011–2012 [Z]. 2017.
- [7] Yang D, Wu X, Yu X, et al. Mutual growth-promoting effect between *Bifidobacterium bifidum* WBB103 and *Listeria monocytogenes* CMCC 54001 [J]. J Dairy Sci, 2017, 100(5): 3448–3462.
- [8] Huang B, Abigail F, Daniel C, et al. Reduced temperature sterilization of stents [J]. J Bioact Compat Pol, 2016, 13(1): 65–72.
- [9] Mckeen L. 1–Introduction to food irradiation and medical sterilization [J]. Effect Steril Method Plast Elastom, 2018: 1–40.
- [10] Song M, Zeng Q, Xiang Y, et al. The antibacterial effect of topical ozone on the treatment of MRSA skin infection [J]. Mol Med Report, 2018, 17(2): 2449–2455.
- [11] Gohar M, Ali HA, Saeed MQ. Use of lytic bacteriophages in controlling multi drug resistant *Staphylococcus Aureus* [J]. J Pakist Med Assoc, 2018, 68(2): 331–332.
- [12] Fernández M, Barcia E, Negro S. Effect of gamma-irradiation on biodegradable microspheres loaded with rasagiline mesylate [J]. J Chil Chem Soc, 2017, 61(4): 3177–3180.
- [13] David PT, Li H, John TN, et al. Biological control of potential antagonistic bacteria isolates to restrict *Magnaporthe grisea* infection on rice [J]. Afr J Microbiol Res, 2017, 11(27): 1108–1119.
- [14] Molins R. Food irradiation-principles and applications [M]. New York: Wiley Interscience Press, 2001.
- [15] 陈殿华. 中国辐照食品的产业化发展[J]. 核农学报, 2004, 18(2): 81–88. Chen DH. The industrialization development of irradiated food in China [J]. J Nucl Agric, 2004, 18(2): 81–88.
- [16] Chen YS, Wang LY, Xing K, et al. Baseline survey of radiation in food around Changjiang nuclear power station [J]. China Trop Med, 2016, 9: 877–879.
- [17] Shin HH, Hwang BH, Cha HJ. Multiplex 16S rRNA-derived geno-biochip for detection of 16 bacterial pathogens from contaminated foods [J]. Biotechnol J, 2016, 11(11): 1405–1414.
- [18] Cock IE. Australian *Acacia* spp. extracts as natural food preservatives: growth inhibition of food spoilage and food poisoning bacteria [J]. Pharm Commun, 2017, 7(1): 4–15.
- [19] Agada GOA, Abdullahi IO, Aminu M, et al. Prevalence and antibiotic resistance profile of *Salmonella* isolates from commercial poultry and poultry farm-handlers in Jos, Plateau State, Nigeria [J]. Brit Microbiol Res J, 2014, 4(4): 462–479.
- [20] Prakash A. Particular applications of food irradiation fresh produce [J]. Radiat Phys Chem, 2016, 129: 50–52.
- [21] Kundu D, Gill A, Lui C, et al. Use of low dose e-beam irradiation to

- reduce *E. coli* O157:H7, non-O157 (VTEC) *E. coli* and *Salmonella* viability on meat surfaces [J]. *Meat Sci*, 2014, 96(1): 413–418.
- [22] Chen Q, Cao M, Chen H, *et al.* Effects of gamma irradiation on microbial safety and quality of stir fry chicken dices with hot chili during storage [J]. *Radiat Phys Chem*, 2016, 127: 122–126.
- [23] Li S, Kundu D, Holley RA. Use of lactic acid with electron beam irradiation for control of *Escherichia coli* O157:H7, non-O157 VTEC *E. coli*, and *Salmonella* serovars on fresh and frozen beef [J]. *Food Microbiol*, 2015, 46: 34–39.
- [24] Ha JW, Back KH, Kim YH, *et al.* Efficacy of UV-C irradiation for inactivation of food-borne pathogens on sliced cheese packaged with different types and thicknesses of plastic films [J]. *Food Microbiol*, 2016, 57: 172–177.
- [25] Jeong SG, Kang DH. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella Typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* in ready-to-bake cookie dough by gamma and electron beam irradiation [J]. *Food Microbiol*, 2017, 64: 172–178.
- [26] Lacivita V, Conte A, Manzocco L, *et al.* Surface UV-C light treatments to prolong the shelf-life of fiordilatte cheese [J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2016, 36: 150–155.
- [27] Lung HM, Cheng YC, Chang YH, *et al.* Microbial decontamination of food by electron beam irradiation [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2015, 44(1): 66–78.
- [28] Ouattara B, Sabato SF, Lacroix M. Use of gamma-irradiation technology in combination with edible coating to produce shelf-stable foods [J]. *Radiat Phys Chem*, 2002, 63(3): 305–310.
- [29] Sugase T, Takahashi T, Serada S, *et al.* SOCS1 gene therapy improves radiosensitivity and enhances irradiation-induced DNA damage in esophageal squamous cell carcinoma [J]. *Cancer Res*, 2017, 77(24): 6975–6986.
- [30] Kurashige T, Shimamura M, Nagayama Y. N-acetyl-L-cysteine protects thyroid cells against DNA damage induced by external and internal irradiation [J]. *Radiat Environ Biophys*, 2017, 56(4): 405–412.
- [31] Hahn MB, Meyer S, Schröter MA, *et al.* Direct electron irradiation of DNA in a fully aqueous environment. Damage determination in combination with Monte Carlo simulations [J]. *Phys Chem Chem, Phys*, 2017, 19(3): 1798–1805.
- [32] Bosshard F, Riedel K, Schneider T, *et al.* Protein oxidation and aggregation in UVA-irradiated *Escherichia coli* cells as signs of accelerated cellular senescence [J]. *Environ Microbiol*, 2010, 12(11): 2931–2945.
- [33] Kuan Y, Bhat R, Patras A, *et al.* Radiation processing of food proteins—a review on the recent developments [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2013, 30(2): 105–120.
- [34] Holdt LM, Kohlmaier A, Teupser D. Molecular roles and function of circular RNAs in eukaryotic cells [J]. *Cell Mol Life Sci*, 2018, 75(6): 1071–1098.
- [35] Schmitz SU, Grote P, Herrmann BG. Mechanisms of long noncoding RNA function in development and disease [J]. *Cell Mol Life Sci*, 2016, 73(13): 2491–2509.
- [36] Xiang Y, Laurent B, Hsu CH, *et al.* RNA m6A methylation regulates the ultraviolet-induced DNA damage response [J]. *Nature*, 2017, 552(7685): 573–576.
- [37] Miller CR, Ruppert AS, Fobare S, *et al.* The long noncoding RNA, *treRNA*, decreases DNA damage and is associated with poor response to chemotherapy in chronic lymphocytic leukemia [J]. *Oncotarget*, 2017, 8(16): 25942–25954.
- [38] Zhang Y, Zeng D, Cao J, *et al.* Interaction of quindoline derivative with telomeric repeat-containing RNA induces telomeric DNA-damage response in cancer cells through inhibition of telomeric repeat factor 2 [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2017, 1861(12): 3246–3256.
- [39] Liu M, Gong X, Alluri RK, *et al.* Characterization of RNA damage under oxidative stress in *Escherichia coli* [J]. *Biol Chem*, 2012, 393(3): 123–132.
- [40] 马春花. RNA 氧化损伤检测方法优化及不同条件下细胞 RNA 氧化损伤分析[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2014.
- Ma CH. Optimization of RNA oxidative damage detection method and analysis of RNA oxidative damage in cells under different conditions [D]. Hefei: Medical University of Anhui, 2014.
- [41] Campanha NH, Pavarina AC, Brunetti IL, *et al.* *Candida albicans* inactivation and cell membrane integrity damage by microwave irradiation [J]. *Mycoses*, 2010, 50(2): 140–147.
- [42] Ley FJ. The control of microorganisms using ionising radiation [M]. Berlin: Springer Netherlands.
- [43] Horneck G, Baumstark-Khan C, Reitz G. Space microbiology: Effects of ionizing radiation on microorganisms in space [M]. John Wiley Sons, Inc, 2003.
- [44] Roberts TA, Ditchett PJ, Ingram M. The effect of sodium chloride on the radiation resistance and recovery of anaerobic spores [J]. *J Appl Bacteriol*, 1965, 28(2): 336–348.
- [45] Zhang C, Wang J, Hua B, *et al.* Establishment of *Salmonella* sp. in pet food irradiation model [J]. *China Brew*, 2011, 7: 42–45.
- [46] Miller TJ. The effects of prior heating or thermotolerance on the subsequent radiosensitivity of cultured intestinal epithelial cells (IEC-17) [J]. *J Appl Polym Sci*, 2001, 82(10): 2583–2589.
- [47] Saroj SD, Shashidhar R, Pandey M, *et al.* Effectiveness of radiation processing in elimination of *Salmonella typhimurium* and *Listeria monocytogenes* from sprouts [J]. *J Food Prot*, 2006, 69(8): 1858–1864.
- [48] Fan X, Niemira BA, Prakash A. Irradiation of fresh fruits and vegetables [J]. *Food Technol*, 2008, 62(3): 36–43.
- [49] Fan X, Sommers CH. Food irradiation research and technology [M]. Iowa: Wiley-Blackwell Publishing Press, 2013.
- [50] WHO: High-dose irradiation: wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a joint FAO/IAEA/WHO study group. WHO Technical Report Series 890 [R]. Geneva: World Health Organization, 1999.
- [51] Miller RB. Electronic irradiation of foods [M]. New York: Food Engineering Series, 2005.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



许 佳, 硕士研究生, 主要研究方向为病原微生物防控及食品安全。

E-mail: 435639309@qq.com

黄金林, 教授, 主要研究方向为人兽共患病病原菌的研究。

E-mail: jinlin@yzu.edu.cn