

## 辐射防护功能食品研究进展

刘永奇<sup>1</sup>, 高航<sup>1,2</sup>, 严湘军<sup>3</sup>, 马玓<sup>2</sup>, 宋景新<sup>1</sup>, 朱家庆<sup>2</sup>, 鲁吉珂<sup>2\*</sup>, 郝利民<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>中国人民解放军军事科学院系统工程研究院军需工程技术研究所 北京 100010

<sup>2</sup>郑州大学生命科学学院 郑州 450001

<sup>3</sup>中国人民解放军 96951 部队 北京 100010)

**摘要** 电离辐射是指能够引起物质电离的辐射,其能够穿透机体组织,对 DNA、脂质、蛋白质等生物大分子造成直接损伤,也可电离水分子产生活性氧自由基,诱导氧化损伤。辐射防护功能食品是指以多酚、多糖、皂苷等功能基料为主,依托适合的食品载体,保护机体造血、免疫和生殖系统等,用于缓解辐射损伤的一类功能性食品。目前报道的辐射防护功能基料资源丰富,然而实际应用于开发该类功能食品的基料种类较少。此外,目前辐射防护功能食品主要以胶囊、复方汤剂等剂型为主,产品形式亟需拓展。以工程化食品为载体,开发新型辐射防护功能食品具有广阔的前景。本文综述辐射防护功能基料的种类和防护作用,辐射防护功能食品的开发现状,并提出未来该类功能食品发展方向,为促进辐射防护功能食品的开发应用提供参考。

**关键词** 电离辐射; 辐射防护; 功能基料; 功能食品; 工程化食品

**文章编号** 1009-7848(2025)12-0320-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.12.028

随着核技术发展的日趋成熟,其应用范围不断拓展,在军事领域,为先进武器装备的研发提供了关键支撑;在医疗领域,从疾病诊断到肿瘤治疗,核技术发挥着不可或缺的作用;在农业领域,利用核技术培育优良品种、病虫害防治等极大地推动了农业的发展。然而,随着核技术应用的普及,电离辐射(Ionizing radiation, IR)对人员健康的影响与日俱增。2011年,福岛第1核电站发生事故,大量放射性物质(铯、锶、氚等)泄漏,产生33.5万t核污水,造成大面积污染。截至2025年2月,日本完成10轮福岛核污水排放,累计7.8万t。此类事件引起人们对IR危害及其防护手段的关注。

IR是指能引起物质电离的辐射,具有波长

短、频率高、能量强等特点,能够穿透机体组织,对细胞DNA、蛋白质等生物大分子造成直接损伤,进而引发基因突变、细胞凋亡等一系列严重后果<sup>[1]</sup>。这种损伤还呈现多靶点、多层次、多器官的复杂特点,不仅会导致疲劳、恶心、呕吐、脱发等急性症状,还会显著增加患癌风险,对人员劳动作业能力和身体健康造成潜在危害<sup>[2]</sup>。为了缓解IR对机体的不利影响,目前主要采取增强辐射屏蔽和摄入辐射防护剂等手段来降低辐射损伤。增强辐射屏蔽通常采用特殊材料,如铅板、含硼聚乙烯等阻挡或减弱辐射的穿透,降低机体受辐射剂量。摄入辐射防护剂则是从人体内部对机体进行保护,缓解IR对造血、免疫、生殖等系统的损伤。辐射防护剂主要分为化学合成类和天然产物类,其中化学合成类包括氨磷汀、雌三醇等氨巯基类和雌激素类药物,它们主要通过恢复机体造血系统、免疫系统、生殖系统等缓解辐射损伤<sup>[3-4]</sup>。然而,化学合成类辐射防护剂副作用明显,包括使人体内激素水平失衡,影响心血管系统功能,造成肝肾损伤等<sup>[5]</sup>。天然产物类辐射防护剂是从动植物、微生物、食药菌等天然食物资源中,通过分离提取和生物工程技术制备的多糖、多酚、黄酮、多肽等天然活性成分,主要通过缓解氧化应激,保护免疫系统和造血系统等途径发挥辐射防护作用<sup>[6]</sup>。天然产物类辐

**收稿日期:** 2025-10-09

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(32172211,32572557);全军后勤重点科研项目(BEP20C006);中原科技创新人才领军计划项目(254200510040);河南省科技研发计划联合基金重点项目(245200810022);河南省高校科技创新团队支持计划项目(26IRTSTHN030)

**第一作者:** 刘永奇,男,博士生

**通信作者:** 郝利民 E-mail: hlm2005@163.com

鲁吉珂 E-mail: lj002004@163.com

射防护剂具有安全性好,副作用小,来源广泛,性价比高等特殊优势,成为辐射防护领域的研究热点。其中,辐射防护功能食品是天然产物类辐射防护剂的重要载体,可作为辐射暴露岗位人员营养膳食的组成部分,为特殊作业人员提供基础性、持续性营养防护,提升机体对辐射环境的适应能力,保护机体健康,是未来辐射防护领域的重要研究方向。

目前,辐射防护功能食品的研究主要聚焦于功能基料开发,已应用的产品种类有限,主要以胶囊、片剂、口服液等剂型为主,存在产品接受度不高,功能营养性不强等问题,并且在特殊作业环境和特勤岗位条件下的食用方便性不好,需进一步优化。以工程化即食食品为载体,结合中国传统饮食文化元素,开发接受性好、食用方便、功能突出、营养全面的新型产品,是辐射防护功能食品未来发展的重要方向。

## 1 电离辐射及其对机体的损伤机制

IR 是指能引起物质电离的辐射总称,辐射源包括  $\gamma$  射线、X 射线和宇宙射线等,其生物学效应与线性能量传递值紧密相关<sup>[1]</sup>。IR 可以通过直接或间接作用电离出物质中的原子和分子,引起物质化学键断裂以及核外电子重排等现象,具备波长短、频率高、能量强等特点<sup>[7]</sup>。

IR 剂量较高时可诱导机体 DNA 损伤及细胞凋亡,进而影响组织、器官的正常形态和功能。IR 致机体损伤的机制主要包括直接作用、间接作用和旁观者效应。在分子机制上,直接作用可致 DNA 靶向损伤,如碱基损伤、单双链断裂、交联形成,还可破坏蛋白质结构,使酶失活、信号通路表达异常及结构蛋白变性等,影响细胞正常结构功能;间接作用主要指自由基效应,IR 可诱导机体内水分子电离,产生羟自由基、超氧阴离子、水合电子等状态不稳、性质活泼的自由基,引发细胞中脂质、蛋白质、核酸的氧化修饰,且通过氧化应激级联反应放大损伤;旁观者效应机制则通过细胞间信号传递,如缝隙连接通讯、细胞外囊泡、可溶性因子等,将信号分子传递给邻近或远处并未受到辐射的细胞,造成其各种生物学功能异常,包括染色体畸变和细胞微核等<sup>[8]</sup>。IR 主要通过以上 3

种途径对机体造成多靶点、多层次、多器官的实质损害。

IR 还会造成系统性病理损伤。对于造血系统可造成骨髓抑制、血小板减少、红细胞生成抑制等<sup>[9]</sup>;对消化系统可造成肠隐窝干细胞受损、肠道菌群移位、消化酶分泌障碍等<sup>[10]</sup>;对生殖系统可造成睾丸和卵巢损伤、生殖细胞突变等<sup>[11]</sup>;对中枢神经系统可造成海马神经抑制、脑屏障破坏、胶质细胞活化等<sup>[12]</sup>。IR 的远期致癌机制包括基因组不稳定性,如染色体易位、原癌基因激活、抑癌基因失活,以及表观遗传调控异常,如 DNA 甲基化紊乱、组蛋白修饰失调、非编码 RNA 异常等<sup>[13]</sup>。综上所述,IR 不仅会引发多系统的急性病理损伤,还存在远期致癌风险,其危害涉及基因组与表观遗传等多个层面。

## 2 化学合成类辐射防护剂研究现状

辐射防护剂是指应用于辐射前后,以缓解机体辐射损伤的一类功能性制剂,依据其来源可大致分为化学药物类和天然产物类。化学药物类辐射防护剂主要应用于急性高剂量 IR 暴露场景,通过清除自由基、恢复造血功能、修复 DNA 等特定分子机制快速减轻辐射损伤,以降低死亡率或减轻器官损伤等为目的,具有短期高效的特点<sup>[14]</sup>。但是其副作用明显,需要严格控制用药剂量及时间。天然产物类辐射防护剂主要应用于长期低剂量辐射暴露场景,通过抗炎、抗氧化、免疫调节等综合作用降低辐射累积损伤效应,以增强机体辐射耐受性、减少慢性辐射引起的癌症、衰老等风险为目的,具有安全、温和、长效等特点,可作为膳食补充剂用于辐射防护功能食品的开发应用<sup>[15]</sup>。

较为典型的化学药物类辐射防护剂有雌激素类、氨基基类等,具体药物包括雌三醇、尼尔雌醇、氨磷汀、半胱胺等。雌激素类药物中的雌三醇和尼尔雌醇,在辐射防护方面发挥重要作用。研究表明,它们有助于提升 IR 小鼠骨髓 DNA 含量,促进小鼠造血系统功能恢复;同时,它们还能增加外周血白细胞数量,增强机体的免疫防御能力,进而提高 IR 小鼠的存活率<sup>[3]</sup>。然而,这类药物存在明显的应用局限性。长期服用雌激素会导致机体激素水平失衡,对于男性,会致使雄激素水平下降,精子

数量减少,严重时甚至会引引起睾丸组织结构发生改变,增加睾丸癌的发病风险<sup>[6]</sup>。氨磷汀属于氨硫基类药物,在辐射防护领域具有特殊地位,它是目前唯一被美国食品药品监督管理局(US Food and Drug Administration, USFDA)批准用于临床治疗辐射损伤的药物。氨磷汀能够有效改善机体造血系统功能,增强机体的抗氧化能力,从而显著缓解IR对机体造成的损伤<sup>[7]</sup>。不过,与许多化学药物类似,氨磷汀也存在诸多副作用。常见的副作用包括呕吐、疼痛等,这些症状可严重影响特殊岗位人员的作业效能;更为严重的是,它还可能引起血压降低,影响心血管系统的正常功能,甚至对肝肾功能造成损害,对机体造成长期不可逆的严重损伤<sup>[8]</sup>。

相比之下,天然产物类辐射防护剂在使用安全性、耐受性等方面具有特殊优势。而且天然产物类辐射防护剂具有种类丰富、来源广泛、生产成本低等特点,有利于工业化生产制备。此外,天然产物类辐射防护剂多为复合成分,包含多种具有辐射防护功能的天然活性物质,它们可通过多种途径共同发挥辐射防护功能,甚至可产生协同增效作用,辐射防护效果更好。基于上述优点,天然产物类辐射防护剂的开发可作为辐射防护功能食品研究的重要方向,进一步促进新型辐射防护功能食品的研发应用。

### 3 天然产物类辐射防护功能基料开发现状

天然产物类辐射防护剂的主要功能基料是从天然产物中通过分离提取以及采用发酵工程、酶工程等生物工程技术制备的多糖、多酚、皂苷、多肽等天然活性物质。相较于化学药物,其安全性好、来源广泛、性价比高,在辐射防护功能产品开发和实际应用过程中具有特殊优势。天然辐射防护功能基料的开发主要以中国传统食物资源及药食同源天然产物为原料,如茶叶、虫草、黄芪、当归、枸杞、桑葚等,同时逐渐向菌藻类、海洋生物拓展,如灵芝、草菇、褐藻以及星虫等<sup>[7,19-20]</sup>。这些天然辐射防护功能基料可以缓解IR对造血、免疫、神经等系统造成的损伤,通过多靶点、多途径发挥辐射防护作用<sup>[6]</sup>。

#### 3.1 多酚类辐射防护剂

多酚是一类存在于水果、蔬菜、茶叶等植物中

的次生代谢产物,分子结构中含有多个酚羟基,具有较强的自由基清除活性和还原能力,是天然的抗氧化剂。多酚具有多种药理活性,包括逆转DNA损伤、调节抗氧化酶活力、抑制氧化应激、缓解炎症等,可以缓解IR诱导的机体损伤,并且其安全性高、副作用小,成为天然产物类辐射防护剂开发的重要资源<sup>[20]</sup>。已报道具有辐射防护功能的食物源多酚包括橄榄叶多酚、薏米青苗多酚、茶多酚等,此类多酚主要通过有机溶剂提取制备,含有多种单体成分,可以通过提升抗氧化酶活力、清除自由基、降低丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量等途径发挥辐射防护作用<sup>[21-23]</sup>。例如,橄榄叶多酚可以提升小鼠外周血白细胞数量、血清超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GSH-Px)活力,降低MDA含量,通过保护机体造血系统和提升抗氧化能力发挥辐射防护作用<sup>[21]</sup>。薏米青苗多酚可以提高<sup>60</sup>Co  $\gamma$ 射线诱导的IR损伤小鼠(辐射剂量6.0 Gy)脾脏指数、外周血白细胞数量和骨髓DNA含量,并且提高血清、肝脏、脾脏中SOD、谷胱甘肽(Glutathione, GSH)和GSH-Px水平,降低MDA含量,通过缓解氧化应激、保护机体造血系统和免疫系统等途径降低IR损伤<sup>[22]</sup>。在此基础上,部分单体多酚类化合物的辐射防护作用及机制逐渐清晰,包括表没食子儿茶素没食子酸酯(Epigallocatechin gallate, EGCG)、白藜芦醇等<sup>[24-25]</sup>。EGCG是绿茶的主要活性成分,含有8个羟基,可以提高IR小鼠的脾脏和胸腺指数,促进淋巴细胞分化增殖,并且显著提高血清、肝脏、脾脏中SOD、GSH-Px活力和GSH含量,降低MDA含量,通过保护机体免疫系统、抗氧化系统发挥辐射防护作用<sup>[24]</sup>;此外,EGCG对IR诱导的小鼠肠道损伤也有明显的保护效果,可显著增加Lgr5+肠道干细胞和Ki67+隐窝细胞数量,逆转IR诱导的肠道菌群失调,恢复厚壁菌门(Firmicutes)/拟杆菌门(Bacteroidota)比例并增加乳酸菌等有益菌的丰度<sup>[26]</sup>。白藜芦醇对IR诱导的肠道损伤具有显著保护效果,可有效提升小鼠肠道GSH含量和过氧化氢酶(Catalase, CAT)活力,降低MDA含量,缓解IR诱导的肠道氧化应激;此外,白藜芦醇可以降低肠道TNF- $\alpha$ 、NF- $\kappa$ B和IL-1 $\beta$ 等炎症因子水平,下调

PI3K、AKT 和 mTOR 的蛋白表达水平,通过抑制炎症反应缓解 IR 诱导的肠道损伤<sup>[27]</sup>。多酚是典型的天然抗氧化剂,可有效缓解 IR 诱导的氧化损伤,并且可通过抗炎、抗凋亡、免疫调节等途径发挥多靶点的保护作用。然而,多酚类功能原料在食品加工和储存中稳定性差、生物利用度低,导致其难以充分发挥辐射防护活性。通过纳米递送、微胶囊化、结构修饰、协同复配等手段可有效提升多酚在辐射防护功能食品中的加工稳定性和生物利用度,促进多酚类辐射防护功能基料的开发应用。

### 3.2 多糖类辐射防护剂

多糖是由 10 个及以上单糖通过糖苷键连接形成的聚合物,广泛存在于动物、植物和微生物体内,是生物体重要的组成部分。天然多糖来源广泛、生物安全性高、生物相容性好,可以通过清除自由基、调节免疫系统、保护造血系统等途径缓解 IR 诱导的机体损伤,尤其是从食物资源和药食同源天然产物中提取制备的多糖在生产加工性能、安全性能等方面具有特殊优势,成为辐射防护功能食品开发的重要资源<sup>[2]</sup>。例如,黄芪多糖可以降低  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线(辐射剂量 5.0 Gy)诱导的 IR 小鼠血清中天门冬氨酸氨基转移酶(Aspartate aminotransferase, AST)和丙氨酸氨基转移酶(Alanine aminotransferase, ALT)含量,并且提升肝脏 SOD、CAT 活力以及 GSH 含量,缓解肝损伤<sup>[28]</sup>;此外,黄芪多糖对 X 射线(辐射剂量 22.5 Gy)诱导的小鼠肺损伤也具有明显保护作用,可显著降低肺组织中 IL-6 和 TNF- $\alpha$  含量,升高 IL-10 和 TGF- $\beta$  含量,缓解肺组织血管和支气管中胶原纤维沉积和肌纤维增生,减轻 IR 诱导的肺部炎症和纤维化<sup>[29]</sup>。茯苓多糖对  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线(辐射剂量 6.0 Gy)诱导的 IR 损伤小鼠具有明显保护作用,可以提升骨髓细胞 DNA 含量,提高血清、肝脏和脾脏中 SOD 活力和 GSH 含量,降低 MDA 水平,通过保护造血系统、缓解氧化应激发挥辐射防护作用<sup>[30]</sup>。银耳多糖可以有效降低  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  射线(辐射剂量 12.0 Gy)诱导的肠道损伤,包括提升肠绒毛长度和隐窝细胞数量,恢复肠道微生物多样性和有益菌丰度,尤其是显著增加拟杆菌属(*Bacteroides*)、阿克曼氏菌属(*Akkermansia*)等与多糖降解相关的益生菌相对丰度,维持肠道微环境稳态<sup>[31]</sup>。人參多糖对机体免

疫系统具有良好的保护作用,包括在细胞水平提升 RAW264.7 细胞中 INF- $\gamma$ 、IL-4、iNOS 和 TNF- $\alpha$  的表达水平以及提高小鼠脾淋巴细胞中 CD4<sup>+</sup>/CD8<sup>+</sup>比例;并且可以缓解  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线(辐射剂量 6.0 Gy)诱导的小鼠肝组织氧化应激,包括提升肝脏 SOD、CAT 和 GSH-Px 活力,降低 MDA 含量等<sup>[32]</sup>。星虫多糖可以缓解  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线(辐射剂量 5.0 Gy)诱导的小鼠造血系统和免疫系统损伤,包括提升小鼠骨髓细胞 DNA 含量、骨髓有核细胞数量、外周血白细胞数量以及胸腺指数等,主要通过保护造血系统和免疫系统发挥辐射防护作用<sup>[33]</sup>。食物来源的多糖类辐射防护功能基料来源广泛、安全性好,具有良好的免疫调节和造血系统保护功能,可调控肠道微环境稳态。然而,其分子结构复杂、工业化提纯难度大、对食品加工条件敏感,限制其在辐射防护功能食品领域的进一步应用。采用物理改性、酶解改性、微胶囊化、纳米包裹等技术手段可有效修饰多糖结构,提升其稳定性和生物活性,促进多糖在辐射防护功能食品领域的高效应用。

### 3.3 皂苷类辐射防护剂

皂苷是一类以三萜或螺旋甾烷类疏水性化合物为苷元,带有亲水性糖链的一类糖苷,主要分布于高等植物中,少量存在于海洋植物中<sup>[34]</sup>。许多中草药如人参、黄芪、刺五加等都含有皂苷类成分,具有抗氧化、免疫调节、保护造血系统等活性,可以缓解 IR 诱导的机体损伤。人参皂苷是人参的主要活性成分,研究表明人参皂苷 Rg1 可以缓解 X 射线(辐射剂量 5.0 Gy)诱导的生殖系统损伤,包括增加精子数量、降低精子畸形率、抑制睾丸细胞凋亡、提升血清睾酮含量等<sup>[35]</sup>;此外,人参总皂苷(含有 Rg1、Rg3、Rk1 等)对  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  射线(辐射剂量 8.0 Gy)诱导的肠道损伤具有明显保护作用,可以降低 TUNEL、PARP 和 Caspase-3 等凋亡蛋白的表达抑制肠上皮细胞凋亡,抑制 NF- $\kappa\text{B}$  和 MAPK 信号通路降低炎症细胞浸润和促炎因子水平(IL-1 $\beta$ 、IL-6、IL-10 和 TNF- $\alpha$ ),提升 SOD 活力、GSH 含量以及降低 MDA 含量缓解氧化应激<sup>[36]</sup>。三七皂苷对  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线(辐射剂量 8.0 Gy)诱导的造血系统损伤具有明显保护作用,可以抑制双链 DNA 断裂,逆转 IR 诱导的血红蛋白含量、白细胞和红细

胞数量降低,并且降低脂质过氧化水平,缓解 IR 诱导的氧化应激<sup>[37]</sup>。苜蓿皂苷可以缓解 X 射线(辐射剂量 4.0 Gy)诱导的小鼠造血系统损伤,包括提升外周血白细胞、红细胞和血小板数量,增加骨髓有核细胞数量,降低微核率等<sup>[38]</sup>。黄芪甲苷对神经系统具有保护作用,研究显示 X 射线(辐射剂量 8.0 Gy)对小鼠神经系统造成病理性损伤,黄芪甲苷可以减轻 IR 小鼠大脑皮层和海马体细胞紊乱,维持细胞结构完整性,并且通过提升 BDNF 和 TrkB 蛋白表达水平,激活 p-ERK1/2、p-CREB、PI3K 等相关蛋白,对 IR 小鼠认知和运动能力具有积极影响<sup>[39]</sup>。皂苷主要通过免疫调节、抗氧化、抗炎等途径发挥辐射防护作用,并且是人参、黄芪等传统滋补品中的重要生物活性成分,市场接受度高。然而,皂苷类成分生物利用度低,可引起胃肠刺激,具有苦味和涩口感,对其在辐射防护功能食品领域的应用提出挑战。通过脂质体包封、纳米递送、结构修饰等手段可增强其生物利用度、掩盖不良风味、降低胃肠刺激,促进皂苷类辐射防护功能食品的开发应用。

### 3.4 多肽类辐射防护剂

生物活性肽是一类能够改变或影响机体代谢活动的小分子化合物,通常由小于 10 个氨基酸组成,可通过酶解法、化学合成法和微生物发酵法等方式制备获得,具有分子质量小、易于吸收和安全性高等特点<sup>[40]</sup>。生物活性肽具有抗氧化、免疫调节等生物活性,可通过缓解 IR 诱导的氧化应激或免疫系统损伤防护机体健康<sup>[41]</sup>。例如,通过酶解玉米蛋白可以获得具有生物活性的玉米肽,对 IR 诱导的肝组织损伤具有显著保护作用,包括降低血清 ALT 和 MDA 含量,升高 SOD 和 GSH-Px 活力,缓解 IR 诱导的氧化应激<sup>[42-43]</sup>。通过酶解法制备的菠萝蜜蛋白肽可以显著缓解 <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线(辐射剂量 7.0 Gy)诱导的小鼠造血系统损伤,显著升高 IR 小鼠外周血白细胞数量和骨髓 DNA 含量,降低血清中 8 羟基脱氧鸟苷(8-hydroxy-2'-deoxyguanosine, 8-OHdG)含量<sup>[44]</sup>。采用地衣芽孢杆菌发酵制备的蛹虫草多肽富含酪氨酸、苯丙氨酸、组氨酸等芳香族氨基酸,对 <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线(辐射剂量 6.0 Gy)诱导的造血系统损伤和氧化应激具有明显保护作

用,包括升高 IR 小鼠白细胞、淋巴细胞和血小板数量,增强血清 SOD 活力,降低 MDA 含量等<sup>[45]</sup>。油菜花粉酶解肽可缓解 <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线(辐射剂量 8.0 Gy)诱导的小鼠骨髓造血系统和氧化还原系统损伤,包括提高 IR 小鼠骨髓 DNA 含量,提升肝脏 SOD 活力,降低肝脏 MDA 含量等,并且可显著降低小鼠骨髓细胞微核率,减少 IR 引起的遗传损伤<sup>[46]</sup>。食物来源的活性肽通常具有安全性高、副作用小等特殊优势,并且具有良好的稳定性,适用于固体饮料、饼干、能量棒等工程化食品的加工应用,是辐射防护功能食品基料开发的重要资源。目前,辐射防护活性肽在应用中存在作用机制不明确、规模化生产和质控难度大等问题,未来需要进一步明确其辐射防护调控机制,通过优化酶解工艺,提高分离纯化技术,建立快速准确的质控体系等途径加速天然活性肽在辐射防护功能食品中的开发应用。

### 3.5 天然产物类辐射防护剂作用途径

天然产物类辐射防护剂多通过食物资源及药食同源天然产物提取制备获得,含有丰富的生物活性成分,多组分之间可针对不同靶器官协同发挥辐射防护作用,具有良好的辐射防护效果,是辐射防护功能食品开发应用的重要资源。本文对 IR 诱导的靶器官/系统损伤典型症状及部分代表性天然辐射防护功能基料的作用途径进行梳理(详见表 1)。针对 IR 对机体造血系统的损伤,茯苓多糖、茶黄素等可通过提升骨髓 DNA 含量、提升造血干细胞的增殖分化能力、降低骨髓细胞微核率等途径保护造血系统<sup>[47-48]</sup>;针对 IR 对机体免疫系统的损伤,黄芪多糖、薏米青苗多酚等可通过提升外周血白细胞数量、改善脾脏抗氧化能力、抑制脾细胞亡、降低脾脏炎症水平等途径保护免疫系统<sup>[22,28]</sup>;针对 IR 对机体生殖系统的损伤,枸杞多糖、茶多酚等可通过增加精细胞数量、抑制精细胞凋亡、缓解睾丸组织氧化损伤等途径保护生殖系统<sup>[49-50]</sup>;此外,灵芝多糖、白藜芦醇等可通过提升肝脏抗氧化酶活力、降低脂质过氧化物含量、抑制肝细胞凋亡等途径缓解 IR 诱导的肝脏损伤<sup>[25,51]</sup>;刺五加多糖、黄杞多酚等可通过调节肠道菌群紊乱、恢复肠道屏障等途径缓解 IR 诱导的肠道损伤<sup>[52-53]</sup>。

表 1 天然产物类辐射防护功能基料及其防护效果

Table 1 Natural radiation protection functional materials and their protective effects

靶器官/系统	典型症状	辐射防护剂作用途径	代表性功能基料	参考文献
造血系统	骨髓细胞 DNA 含量降低; 骨髓细胞微核率升高; 骨髓造血能力降低	提升骨髓细胞 DNA 含量; 降低细胞微核率; 提升造血干细胞增殖和分化能力	茯苓多糖、虫草多糖、茶黄素等	[33], [47], [48]
免疫系统	外周血白细胞数量降低; 脾脏氧化损伤; 脾细胞凋亡; 淋巴细胞数量减少	提升外周血白细胞数量; 提升脾脏和胸腺指数; 提升脾脏 SOD、GSH-Px、CAT 酶活, 降低 MDA 含量; 促进 Bcl-2、Bcl-xL 等抗凋亡蛋白表达, 抑制 p53、Bax、Caspase-9 等促凋亡蛋白的表达; 刺激 IL-2、IL-10、INF- $\gamma$ 等细胞因子产生, 促进 T 淋巴细胞增殖	黄芪多糖、沙苑子黄酮、蛹虫草多肽等	[28], [45], [54]
生殖系统	精细胞凋亡; 睾丸氧化损伤	增加精细胞数量; 提升睾丸 SOD、CAT 等抗氧化酶活, 降低 MDA、LPO 等脂质过氧化物含量	枸杞多糖、山楂黄酮、茶多酚等	[49], [50], [55]
肝组织	肝脏氧化损伤; 肝细胞凋亡	提升肝脏 SOD、GSH-Px、CAT 酶活, 降低 MDA 含量; 降低血清 AST、ALT 水平; 促进 Nrf2 进核及下游 HO-1、NQO1 等抗氧化蛋白表达; 促进 Bcl-2、Bcl-xL 等抗凋亡蛋白表达, 抑制 p53、Bax、CytC、Caspase-3 等促凋亡蛋白表达; 缓解肝细胞炎性浸润、细胞核萎缩	灵芝多糖、白藜芦醇、油菜花酶解肽等	[25], [46], [51]
肠组织	肠道微生物紊乱; 肠道屏障损伤	门水平恢复厚壁菌门/拟杆菌门丰度比例, 降低变形菌门(Proteobacteria)丰度; 属水平增加阿克曼氏菌属、乳杆菌属( <i>Lactobacillus</i> )等有益菌丰度; 促进 Occludin、Claudin-1、ZO-1 等紧密连接蛋白表达, 改善肠绒毛高度及隐窝深度	刺五加多糖、银耳多糖、黄杞多酚等	[31], [52], [53]

#### 4 辐射防护功能食品与功能制剂开发现状

目前以天然产物类辐射防护功能基料为基础开发的辐射防护系列产品主要包括中药复方、保健食品等, 这些产品主要以药食同源天然产物如黄芪、当归、人参等为功能原料, 通过添加辅料加工制成复方汤剂、胶囊等形式, 可通过保护机体造血系统、免疫系统、生殖系统等缓解辐射损伤。

益气养阴方主要由黄芪、人参、女贞子、当归等配伍组成, 通过调节机体造血系统发挥辐射防护作用, 可提升机体白细胞、红细胞、骨髓细胞数量, 并降低造血祖细胞、造血干细胞、骨髓单核细胞中活性氧 (Reactive oxygen species, ROS) 水平, 缓解 IR 诱导的造血系统损伤<sup>[56]</sup>。健脾补肾方主要由熟地黄、炙甘草、当归、黄芪、泽泻、陈皮配

伍组成, 通过调节机体造血系统和免疫系统发挥辐射防护作用, 可提升 IR 损伤小鼠外周血白细胞、淋巴细胞、红细胞数量及血红蛋白含量, 并显著提升小鼠胸腺指数和脾脏指数, 降低 IR 对机体造血和免疫系统的损伤<sup>[57]</sup>。此外, 部分复方类产品可调节辐射相关信号通路表达, 具体涉及炎症和抗氧化信号通路。例如, 当归补血汤主要以当归和黄芪为功能原料, 能够干预 FasL/TNF- $\alpha$  表达, 阻断凋亡信号传导通路, 抑制心肌细胞凋亡, 可减轻 IR 诱导的心肌细胞损伤<sup>[58]</sup>。凉血固元汤主要由生晒参、水牛角、生地、赤芍、丹皮等通过煎煮、浓缩制备, 可以抑制 IR 大鼠胃组织中 Bax 与 Caspase-3 在基因水平和蛋白水平的表达, 降低 Bax/Bcl-2 的比例, 抑制细胞凋亡, 缓解 IR 诱导的胃损伤<sup>[59]</sup>。

刺白胶囊以刺五加、白花舌蛇草为主要原料,呈灰褐色粉末状,其单体活性成分主要包括紫丁香苷、槲皮素、山奈酚、阿魏酸等。研究表明刺白胶囊可显著提升 IR 小鼠脾脏和胸腺指数,提高脾脏和胸腺中 SOD 活力,降低 MDA 含量,缓解 IR 诱导的脾脏和胸腺氧化应激,并降低血清中 IL-1 $\beta$ 、IL-2、IL-6 和 INF- $\gamma$  的含量,缓解 IR 诱导的炎症反应<sup>[60]</sup>。参力胶囊主要由黄芪、人参、灵芝孢子粉组成,对 <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线(辐射剂量 5.0 Gy)诱导的大鼠免疫系统和肝脏损伤具有明显保护作用,可以降低大鼠外周血白细胞数量、提高胸腺指数缓解辐射对免疫系统的损伤,并且可以提高肝脏 GSH-Px 活力,降低肝脏 MDA 含量以及血清 ALT 水平,缓解 IR 对肝组织的损伤<sup>[61]</sup>。

复方汤剂和胶囊类辐射防护制剂通过多种辐射防护原料复配,功能因子之间协同作用,可通过多种途径缓解 IR 诱导的机体损伤,辐射防护效果显著。但是由于剂型限制,这些产品无法满足作业人员的热量营养需求,并且存在储运食用不方便等问题,导致其在特殊环境中使用受限。此外,部分人群对复方汤剂和胶囊剂的产品形式接受度不高,存在“是药三分毒”的刻板印象。因此,需要进一步改进辐射防护功能基料的食物载体种类形式,创制环境适应性强、人群接受度高的新型辐射防护功能食品。

作者团队通过高效分离提取以及采用发酵工程、酶工程等生物工程技术,从植物、微生物、食用菌等天然资源中筛选制备了一批具有辐射防护功能的食物基料,包括多糖、多酚等。这些基料可以调节机体造血系统、免疫系统、抗氧化系统等,通过多种途径发挥辐射防护效果。基于特殊作业环境潜在辐射危害和作业人员功能热量营养需求,结合工程化食品创制技术,考虑不同功能基料的理化性质和风味特征,团队开发了以压缩干粮、固体饮料、果糕、果泥、羊羹等即食型工程化食品为载体的新型辐射防护功能食品,它们具有功能针对性强、能量营养丰富、保质期长、接受度高等优势,可有效满足特殊岗位作业人员健康防护需求。未来,伴随核技术的进一步广泛应用,辐射防护功能食品的市场规模将继续增大,依托工程化食品载体开发的新型辐射防护功能食品的创新发

展将满足各类人群对于辐射防护食品的多元化需求。

## 5 未来辐射防护特种功能食品开发的前景与挑战

### 5.1 新原料开发拓展及功能基料数据库建立

寻找绿色、安全、有效的天然辐射防护功能基料成为目前辐射防护特种功能食品开发领域的研究热点。天然来源的多糖(如灵芝多糖、海带褐藻多糖)、多酚(如茶多酚、白藜芦醇)、黄酮(如槲皮素、芦丁)等功能基料因高效、绿色、安全等优势成为辐射防护功能食品开发的关注重点。未来天然辐射防护功能基料的开发可聚焦于以下方向:一是生物技术赋能传统功能基料制备。例如,采用酶工程技术定向酶解蛋白质,可获得具有辐射防护功能的活性肽;采用发酵工程技术结合富硒技术,可制备具有辐射防护功能的富硒酵母肽;采用发酵工程技术,制备深层液态发酵食用菌产物,富含多糖、多酚等活性成分,并且可通过微生物转化提升活性成分的辐射防护功能;采用合成生物学技术,通过解析天然活性成分生物合成途径、构建“细胞工厂”、优化工程菌产量与效率等环节,高效制备天然产物类辐射防护剂。二是功能基料防护效应的拓展与深化研究。例如,茯苓多糖、黄芪多糖对免疫系统和造血系统的保护效果显著,但是其对于 IR 诱导的生殖系统和肠道损伤保护效果值得进一步研究,以拓展现有功能基料的防护途径和应用场景。此外,天然辐射防护功能基料的遗传健康效应值得深化研究,基于 IR 诱导的表观遗传、代际损伤效应,部分功能基料可能通过保护生殖细胞的基因组和表观基因组的完整性与稳定性,实现表观遗传防护和代际遗传防护。三是功能基料数据库的建立与应用。天然辐射防护功能基料的种类繁多、作用靶点分散、构效关系不明确,导致新型功能基料筛选效率低下、产品配方设计缺乏系统性。建立天然辐射防护功能基料数据库,可系统整合基料来源(食药真菌、动植物、微生物)、化学结构(糖链分支度、酚羟基数目等)、作用途径(保护造血、免疫、生殖系统等)、作用机制(Nrf2/NF- $\kappa$ B、MAPK 信号通路调控等)及毒理代谢数据。在此基础上,结合多组学技术解析功能基

料在细胞内的代谢路径与靶点网络;引入人工智能模型对海量数据进行深度挖掘,建立“结构特征-关键靶点-活性强度”的预测框架,形成“成分-功能-机制”多维关联图谱,为靶向筛选和功能验证提供数据支撑。通过“计算预测-模拟验证-实验确证”的闭环流程,可大幅提升辐射防护功能基料的开发效率。此外,针对不同功能基料的作用靶点,通过数据库高效组合、复配功能基料,将促进新型辐射防护功能食品的开发。

## 5.2 功能基料的高效递送及稳态化研究

天然辐射防护功能基料的开发主要以多糖、多酚、黄酮等化合物为主,由于自身结构特点,它们在食品加工、贮存、代谢等过程中难以维持稳定高效的生物活性。可采用绿色、安全、高效的功能因子递送技术对其进行改造,以提升其生物利用度和辐射防护活性。但是目前关于天然产物类辐射防护剂纳米递送体系的研究较少,亟待开发拓展以促进天然辐射防护功能基料在功能食品领域的高效稳定应用。

对于多酚和黄酮类辐射防护功能基料,其主要特点是分子质量小、稳定性差、部分化合物疏水性强,导致其生物利用度低,难以充分发挥体内辐射防护活性<sup>[62]</sup>。为改善其生物利用度和生物活性,一是可以使用亲水性载体如壳聚糖、环糊精、酪蛋白等对其进行封装,以提升其亲水性、稳定性和生物利用度。例如,采用乳化交联的方法可以制备壳聚糖-红松塔多酚微球,显著提升红松塔多酚的稳定性、生物利用度和辐射防护活性,相较于红松塔多酚,微球对 IR 小鼠血清 SOD 活力的提升、MDA 含量的降低以及脾细胞增殖分化能力更强,表现出更好的辐射防护活性<sup>[63]</sup>。采用可溶性大豆蛋白对天然辐射防护剂姜黄素进行装载,可有效提升其水溶性、稳定性,在紫外照射 4 h、90 °C 加热 2 h、25 °C 储存 15 d 后,姜黄素保留率分别可达 79.03%、73.43% 和 87.92%,并且经过胃肠模拟消化后,复合纳米颗粒的生物利用度比游离的姜黄素高 4 倍<sup>[64]</sup>。二是可依靠小分子自身多羟基结构和组装特性,通过超分子自组装或共组装制备纳米颗粒。例如,咖啡酸苯乙酯和积雪草酸可以通过分子间氢键和疏水作用共组装形成纳米颗粒,提升咖啡酸苯乙酯的水溶性、稳定性和抗氧化活

性<sup>[65]</sup>。天然萜类活性成分松香酸可以通过分子间氢键和疏水作用自组装形成纳米颗粒,稳定性和抗氧化活性显著提升,并且能够在胃肠消化过程中持续缓释,延长半衰期,提高体内生物活性<sup>[66]</sup>。对于多糖类功能基料,其主要特点是分子质量大、结构松散、生物利用度低,可采用反溶剂沉淀法、乳化法等制备为纳米颗粒、纳米乳液、纳米凝胶等,提升生物利用度和体内生物活性<sup>[67]</sup>。例如,采用乳化法制备的天麻多糖与羧甲基壳聚糖纳米凝胶具有良好的生物相容性、可降解性及自修复性能,并且可用于制备负载天麻素的纳米微球,通过调控 MAPK 通路(下调 p-p38、p-ERK)及 Bcl-2/Bax/Caspase-3 通路,抑制皮肤细胞凋亡,促进皮肤修复,对 UVB 诱导的皮肤损伤具有保护作用<sup>[68]</sup>。此外,部分多糖类辐射防护功能基料具备递送潜力,可作为小分子辐射防护基料的高效递送载体,采用绿色制备技术,依靠分子组装特性开发的多糖-多酚复合纳米递送体系,可提升功能基料的生物利用度,同时产生协同增效作用,可成为解决天然产物类辐射防护剂高效、稳定递送问题的有效手段。

## 5.3 功能基料对食品品质的影响研究

天然辐射防护功能基料虽然具有绿色安全的优势,但其原料来源多样性与理化特性差异为食品开发带来了多种挑战。一方面,植物性基料(如青稞苗粉、绿茶多酚)与微生物来源基料(如双孢菇多糖、酵母  $\beta$ -葡聚糖)在颜色、气味、溶解性等方面存在显著差异,过量添加易引发感官品质劣变。另一方面,多酚、多糖和蛋白质之间可通过共价结合和非共价方式相互结合,对蛋白质的乳化、凝胶、界面特性等产生影响,影响食品品质<sup>[69]</sup>。例如,茶多酚可与淀粉蛋白相互作用,影响淀粉的糊化、老化特性,较低的添加量( $\leq 0.1\%$ )可降低面包硬度和胶黏性,赋予面包更优的质构特性,但是过高的添加量则会对面包品质产生不利影响<sup>[70]</sup>。

针对功能基料与食品体系的适配性问题,可通过技术创新与产品形态设计实现突破。在技术上,采用微胶囊包埋可有效掩蔽刺梨原浆的酸涩味,同时提高黄酮类物质的稳定性,使其在气泡饮料中既能保持辐射防护活性,又不会因 pH 值波动及光照、氧化等影响导致产品风味和品质的劣

变;利用酶解改性可降低酸角果泥的纤维粗糙感,提升果糕类产品的细腻度。在产品形态设计上,需依据基料特性匹配适宜载体。对于色泽深、味道浓郁的基料,可开发深色系功能巧克力或能量棒,利用可可风味掩盖基料异味;对于热敏性成分,则优先选择低温加工的咀嚼片或冻干食品,避免活性损失。

#### 5.4 辐射防护特种功能食品中特征标志成分检测

辐射防护特征标志成分的检测对相关产品的招标生产、原料质控和产品品控具有重要意义。一方面,检测结果可作为制定产品技术规范的科学依据,也是招标生产过程中筛选合格产品和合格企业的重要依据,确保原料和工艺符合标准;另一方面,在品控环节通过定期抽查检测主要原料和终端产品中标志性成分含量,可保障产品质量稳定性,同时满足监管部门对功能食品有效性和安全性的监管要求。特征标志成分检测主要包括原料端和产品端检测。原料端检测的意义在于直接定量原料中辐射防护活性成分,这是产品发挥辐射防护活性的根本前提。原料端检测主要通过感官鉴别、指纹图谱、成分定量检测、总多酚/总多糖含量检测等手段确保原料的稳定性。产品端检测的意义在于确保终端产品的质量和稳定性。相较于药品,食品的原料体系更加复杂,这会对功能食品活性成分定性或定量检测产生一定影响,因此在功能基料和功能食品活性成分定量检测中需要注意原料和产品前处理,主要包括产品中活性成分的提取、分离和富集等步骤,需要根据活性成分理化性质,选择合适的提取和萃取溶剂,并且要尽量避免活性成分的变性和降解。在活性成分检测阶段,对于多酚、黄酮等小分子化合物,可通过明确特征单体成分,基于高效液相色谱(High performance liquid chromatography, HPLC)技术或液相色谱-质谱联用(Liquid chromatography-Mass spectrometry, LC-MS)技术定量检测特征单体成分含量,评价产品的质量和稳定性。针对多糖类活性成分难以定量检测的问题,可通过以下方法优化:一是通过化学衍生化处理(如苯酚-硫酸法)将多糖转化为显色或荧光化合物,结合分光光度法或荧光检测器进行定量;二是采用特异性酶解法释放特征单糖片段,通过HPLC检测标志性单糖

含量间接推算多糖总量;三是开发基于单克隆抗体的酶联免疫吸附法,利用抗原-抗体特异性结合实现靶向定量。原料质控和产品品控是辐射防护功能食品转化、应用、发展的基石,未来通过AI赋能传统检测手段实现辐射防护特征标志成分的高通量、快速、准确定量检测,将进一步加速辐射防护功能食品的规模化应用。

## 6 结论

目前,结合中国传统饮食文化开发辐射防护特种功能食品的难点在于食源性辐射防护功能基料的筛选复配、辐射防护特种功能食品的选型创制以及辐射防护功能特征标志成分检测分析等。未来辐射防护功能基料稳态化应用研究、功能基料与食品性能品质关系研究、功能基料数据库建设以及辐射防护功能特征标志成分检测分析技术方法研究,将进一步促进辐射防护功能基料的挖掘开发、辐射防护特种功能食品的研制应用。

## 参 考 文 献

- [1] 鲁吉珂, 陈培, 曹娜娜, 等. miRNA与电离辐射防护功能食品研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 295-300.  
LU J K, CHEN P, CAO N N, et al. Recent advances in miRNA and functional foods against ionizing radiation[J]. Food Science, 2020, 41(15): 295-300.
- [2] ZHU R Q, JIANG Y P, LI K, et al. Plant polysaccharides mitigate ionizing radiation injury via multi-tissue protection and multi-target mechanisms: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 320: 146197.
- [3] WU T C, LIU W, FAN T, et al. 5-Androstenediol prevents radiation injury in mice by promoting NF- $\kappa$ B signaling and inhibiting AIM2 inflammasome activation[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2020, 121: 109597.
- [4] YU X, LI M S, ZHU L, et al. Amifostine-loaded armored dissolving microneedles for long-term prevention of ionizing radiation-induced injury[J]. Acta Biomaterialia, 2020, 112: 87-100.
- [5] 吴铭, 纪晨萱, 吴小勇, 等. 天然活性产物抗电离辐

- 射活性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 390-400.
- WU M, JI C X, WU X Y, et al. Research progress on the anti-ionizing radiation activity of active natural products[J]. Food Science, 2023, 44(11): 390-400.
- [6] LI X X, YU L Y, XU H C, et al. Research on the mechanisms of natural products in radiation protection[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2025, 13: 1640682.
- [7] WANG W J, XUE C H, MAO X Z. Radioprotective effects and mechanisms of animal, plant and microbial polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 373-384.
- [8] KIANG J G, OLABISI A O. Radiation: A poly-traumatic hit leading to multi-organ injury[J]. Cell & Bioscience, 2019, 9(1): 1-15.
- [9] ZHANG Y M, CHEN X L, WANG X M, et al. Insights into ionizing radiation-induced bone marrow hematopoietic stem cell injury[J]. Stem Cell Research & Therapy, 2024, 15(1): 222.
- [10] JAMEUS A, DOUGHERTY J, NARENDRULA R, et al. Acute impacts of ionizing radiation exposure on the gastrointestinal tract and gut microbiome in mice[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(6): 3339.
- [11] HISANORI F, NOBUYUKI H. Testicular exposure to ionizing radiation and sperm epigenetic alterations as possible mechanisms of hereditary effects: Perspectives from the viewpoint of radiation protection[J]. International Journal of Radiation Biology, 2024, 101(2): 1-6.
- [12] RU Y, ZHANG X X, SHEN B Y, et al. Delayed reaction of radiation on the central nervous system and bone system in C57BL/6J mice[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 25(1): 337.
- [13] BELLI M, TABOCCHINI M A. Ionizing radiation-induced epigenetic modifications and their relevance to radiation protection[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(17): 5993.
- [14] MISHRA K N, MOFTAH B A, ALSBEIH G A. Appraisal of mechanisms of radioprotection and therapeutic approaches of radiation countermeasures[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2018, 106: 610-617.
- [15] PRASAD J B, SUBHASWARAJ P, RAKESH A, et al. Phytochemicals: A potential next generation agent for radioprotection[J]. Phytomedicine: International Journal of Phytotherapy and Phytopharmacology, 2022, 106: 154188.
- [16] COOKE P S, WALKER W H. Nonclassical androgen and estrogen signaling is essential for normal spermatogenesis[J]. Seminars in Cell & Developmental Biology, 2021, 121: 71-81.
- [17] JI L H, CUI P G, ZHOU S W, et al. Advances of amifostine in radiation protection: Administration and delivery[J]. Molecular Pharmaceutics, 2023, 20(11): 5383-5395.
- [18] PANDITA D, NISHAD D K, MISHRA J, et al. Synthetic and natural radioprotective agents: Recent status and their underlying mechanism of action[J]. Current Pharmaceutical Biotechnology, 2025, 26(5): 700-715.
- [19] ABRAHAM R E, ALGHAZWI M, LIANG Q, et al. Advances on marine-derived natural radioprotection compounds: Historic development and future perspective[J]. Marine Life Science & Technology, 2021, 3(4): 474-487.
- [20] LI K D, JI M X, SUN X J, et al. Food polyphenols in radiation-related diseases: The roles and possible mechanisms[J]. Current Nutrition Reports, 2024, 13(4): 884-895.
- [21] 孙美君, 孔杭如, 赵珈莹, 等. 橄榄叶中多酚含量的测定及其抗辐射作用研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 44-48.
- SUN M J, KONG H R, ZHAO J Y, et al. Polyphenol analysis of olive leaf and its anti-radiation effect on mice[J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 44-48.
- [22] LI X, YI J J, ZHU J Q, et al. Protective effect of coix seed seedling extract on  $^{60}\text{Co}$  -  $\gamma$  radiation - induced oxidative stress in mice[J]. Journal of Food Science, 2021, 87(1): 438-449.
- [23] TIWARI M, DIXIT B, PARVEZ S, et al. EGCG, a tea polyphenol, as a potential mitigator of hematopoietic radiation injury in mice[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2017, 88: 203-209.
- [24] YI J J, CHEN C, LIU X, et al. Radioprotection of EGCG based on immunoregulatory effect and antioxidant activity against  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  radiation-induced injury in mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 135: 111051.

- [25] ZHANG H, ZHAI Z, WANG Y Y, et al. Resveratrol ameliorates ionizing irradiation-induced long-term hematopoietic stem cell injury in mice[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2013, 54: 40–50.
- [26] LI W X, CAI S, TIAN S Z, et al. Green tea derivative (-)-epigallocatechin-3-gallate (EGCG) confers protection against ionizing radiation-induced intestinal epithelial cell death both *in vitro* and *in vivo*[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2020, 161: 175–186.
- [27] RADWAN R R, KARAM H M. Resveratrol attenuates intestinal injury in irradiated rats via PI3K/Akt/mTOR signaling pathway[J]. *Environmental toxicology*, 2020, 35(2): 223–230.
- [28] LIU Y, LIU F, YANG Y, et al. Astragalus polysaccharide ameliorates ionizing radiation-induced oxidative stress in mice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 68: 209–214.
- [29] 张容, 周儒兵, 周双容. 黄芪多糖减轻放射引起的小鼠肺部炎症和纤维化[J]. *中国组织化学与细胞化学杂志*, 2020, 29(4): 321–327.
- ZHANG R, ZHOU R B, ZHOU S R. Astragalus polysaccharides attenuates radiation-induced inflammation and fibrosis of the lung in mice[J]. *Chinese Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 2020, 29(4): 321–327.
- [30] SUO K K, ZHENG C Q, LI Z P, et al. Radioprotective effects of polysaccharides from *Poria cocos* peels against  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  induced oxidative damage *in vitro* and *in vivo*[J]. *Journal of Future Foods*, 2025, 6(6): 582–590.
- [31] DING J J, GOU W F, MA M W, et al. Investigation of the fingerprint-activity relationship of *Tremella fuciformis* polysaccharides and its mitigating effect on radiation-induced intestinal injury[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 304: 140849.
- [32] FENG L, SHI P X, ZHAO L C, et al. Structural characterization of polysaccharides from *Panax ginseng* C. A. Meyer root and their triggered potential immunoregulatory and radioprotective activities[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 280: 135993.
- [33] JIANG S Q, SHEN X R, LIU Y M, et al. Radioprotective effects of *Sipunculus nudus* L. polysaccharide combined with WR-2721, rhIL-11 and rhG-CSF on radiation-injured mice[J]. *Journal of Radiation Research*, 2015, 56(3): 515–522.
- [34] SUDHA P, VEENU J, KAMAL S, et al. Plants' steroidal saponins – A review on its pharmacology properties and analytical techniques[J]. *World Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2022, 8(3): 350–385.
- [35] ZHOU Q H, OU Y Q, TIAN X S, et al. Ginsenoside Rg1 alleviates chronic testicular damage caused by cranial irradiation through the SCF/PI3K/Akt/mTOR pathway in mice[J]. *Radiation Medicine and Protection*, 2025, 6(1): 11–21.
- [36] TEAK C H, HO K J, WAN H, et al. Explosively puffed ginseng ameliorates ionizing radiation-induced injury of colon by decreasing oxidative stress-related apoptotic cell execution in mice [J]. *Journal of Medicinal Food*, 2019, 22(5): 490–498.
- [37] YANG M Y, ZHAO X H. *Panax notoginseng* saponins ameliorate gamma radiation-mediated damages in human peripheral blood monocytes and Swiss albino mice[J]. *Cell Biochemistry and Function*, 2024, 42(7): e4115.
- [38] 张明, 李志威, 刘建宇, 等. 苜蓿皂苷对X射线照射小鼠造血系统的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(7): 78–84.
- ZHANG M, LI Z W, LIU J Y, et al. Effect of alfalfa saponins on hematopoietic system of mice irradiated by X-ray[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 78–84.
- [39] LIU X, DING Y P, JIANG C X, et al. Astragaloside IV ameliorates radiation-induced nerve cell damage by activating the BDNF/TrkB signaling pathway[J]. *Phytotherapy Research: PTR*, 2023, 37(9): 4102–4116.
- [40] 黄磊, 韩立华, 王凯, 等. 食源蛋白抗氧化肽的研究进展及其在改善心血管健康中的应用[J/OL]. *食品科学*, [2025-06-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20250618.1414.016>.
- HUANG L, HAN L H, WANG K, et al. Recent advances in food-derived antioxidant peptides and their role in improving cardiovascular health[J/OL]. *Food Science*, [2025-06-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20250618.1414.016>.
- [41] 珠娜, 李勇. 生物活性肽的辐射防护作用的研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2020, 26(2): 62–65.
- ZHU N, LI Y. Research progress of radioprotective

- effect of bioactive peptides[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(2): 62–65.
- [42] 罗军, 李晓宇, 王海燕, 等. 玉米肽对微波辐射大鼠肝组织损伤的治疗作用[J]. 吉林医药学院学报, 2014, 35(5): 321–323.
- LUO J, LI X Y, WANG H Y, et al. Treatment of corn peptide on damage of hepatic tissue in microwave radiation rats[J]. Journal of Jilin Medical University, 2014, 35(5): 321–323.
- [43] 罗军, 张巍, 李妍, 等. 玉米肽对微波辐射大鼠肝组织抗氧化系统损伤的治疗作用[J]. 中国兽医杂志, 2014, 50(9): 26–27, 30.
- LUO J, ZHANG W, LI Y, et al. Treatment of corn peptide on antioxidant system damage of hepatic tissue in microwave radiated rats[J]. Chinese Journal of Veterinary Medicine, 2014, 50(9): 26–27, 30.
- [44] 刘爱青, 王海燕, 王应强, 等. 2种蛋白肽对电离辐射损伤小鼠的保护作用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 359–364.
- LIU A Q, WANG H Y, WANG Y Q, et al. Radioprotective effect of two kinds of protein peptides in rayirradiated mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 359–364.
- [45] 杨淑芳, 张春杨, 钱琨, 等. 蛹虫草抗氧化肽的发酵制备及对小鼠辐射氧化损伤的防护作用[J]. 蚕业科学, 2017, 43(3): 496–501.
- YANG S F, ZHANG C Y, QIAN K, et al. Fermentation preparation of antioxidant peptides from cordyceps militaris and its protective effect to mice with irradiation-induced oxidative damage[J]. Acta Sericologica Sinica, 2017, 43(3): 496–501.
- [46] 胡筱波, 温成荣, 庞杰, 等. 油菜花粉酶解肽对<sup>60</sup>Co $\gamma$ 辐射损伤小鼠造血功能的影响[J]. 现代食品科技, 2013, 29(2): 219–222, 246.
- HU X B, WEN C R, PANG J, et al. Effects of peptide from rape pollen glutelin on hemopoietic function promotion of mice irradiated by <sup>60</sup>Co $\gamma$ [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(2): 219–222, 246.
- [47] ZHENG C Q, SHAO Y W, HAO L M, et al. Extraction, characterization, and biological activities of a polysaccharide from *Poria cocos* peels[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(10): e16821.
- [48] HAN X D, ZHANG J L, XUE X L, et al. Theaflavin ameliorates ionizing radiation-induced hematopoietic injury via the NRF2 pathway[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2017, 113: 59–70.
- [49] 陈志云, 李杰, 冯雨, 等. 茶多酚生物活性及作用机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 333–341.
- CHEN Z Y, LI J, FENG Y, et al. Research progress on bioactivity and mechanism of tea polyphenols[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 333–341.
- [50] LUO Q, LI J J, CUI X Y, et al. The effect of *Lycium barbarum* polysaccharides on the male rats' reproductive system and spermatogenic cell apoptosis exposed to low-dose ionizing irradiation[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2014, 154(1): 249–258.
- [51] YU C M, FU J Q, GUO L D, et al. UPLC-MS-based serum metabolomics reveals protective effect of *Ganoderma lucidum* polysaccharide on ionizing radiation injury[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 258: 112814.
- [52] SONG C, YIN Y S, QIN Y, et al. *Acanthopanax senticosus* extract alleviates radiation-induced learning and memory impairment based on neurotransmitter-gut microbiota communication[J]. CNS Neuroscience & Therapeutics, 2023, 29: 129–145.
- [53] WU S H, TIAN C, TU Z W, et al. Protective effect of total flavonoids of *Engelhardia roxburghiana* Wall. leaves against radiation-induced intestinal injury in mice and its mechanism[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2023, 311: 116428.
- [54] 齐琳, 吴文倩, 陈韶华, 等. 沙苑子黄酮对辐射损伤的抗氧化保护作用[J]. 上海中医药杂志, 2011, 45(5): 73–77.
- QI L, WU W Q, CHEN S H, et al. Protective effect of antioxidation of flavonoids of *Astragali complanali* against radiation damage[J]. Shanghai Journal of Traditional Chinese Medicine, 2011, 45(5): 73–77.
- [55] 郭娜, 孙云朝, 孙春霞, 等. 山楂黄酮通过抑制 ROS/NLRP3 信号通路对辐射损伤小鼠睾丸的保护作用[J]. 中成药, 2023, 45(1): 258–263.
- GUO N, SUN Y Z, SUN C X, et al. Protective effect of *Crataegus pinnatifida* Bunge flavonoids on radiation-induced testicular injury in mice by inhibiting the ROS/NLRP3 signaling pathway[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2023, 45(1): 258–263.

- [56] ZHANG J L, LI H Y, LU L, et al. The yiqi and yangyin formula ameliorates injury to the hematopoietic system induced by total body irradiation [J]. *Journal of Radiation Research*, 2017, 58(1): 1-7.
- [57] 何东初, 肖静静, 张梦云, 等. 健脾补肾方对辐射损伤小鼠全血细胞及免疫器官的影响研究[J]. *现代中西医结合杂志*, 2022, 31(22): 3067-3073, 3105.
- HE D C, XIAO J J, ZHANG M Y, et al. Effect of Jianpi Bushen decoction on whole blood cells and immune organs of radiation injured mice[J]. *Modern Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 2022, 31(22): 3067-3073, 3105.
- [58] 赵信科, 汪鸣, 邱勇玉, 等. 基于 FasL/TNF- $\alpha$  信号通路的当归补血汤对放射性心肌损伤凋亡反应的影响探讨[J]. *时珍国医国药*, 2020, 31(6): 1312-1314.
- ZHAO X K, WANG M, QIU Y Y, et al. The effect of Danggui Buxue decoction on the apoptotic response in radiation-induced myocardial injury via the FasL/TNF- $\alpha$  signaling pathway[J]. *Journal of Lishizhen Traditional Chinese Medicine*, 2020, 31(6): 1312-1314.
- [59] 王毓国, 冯剑, 窦永起. 基于 Bax、Bcl-2、与 Caspase-3 探讨凉血固元汤对大鼠急性胃辐射伤的作用机制[J]. *环球中医药*, 2019, 12(11): 1625-1630.
- WANG Y G, FENG J, DOU Y Q. Mechanism of Liangxue Guyuan decoction on acute gastric radiation injury in rats based on Bax, Bcl-2 and Caspase-3 [J]. *Global Traditional Chinese Medicine*, 2019, 12(11): 1625-1630.
- [60] 梅雨. 刺白胶囊及其有效成分对低剂量辐射防护的研究[D]. 北京: 军事科学院, 2023.
- MEI Y. Study on the protection of Cibai capsule and its effective components against low dose radiation[D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2023.
- [61] 王锦, 李龙, 马善波, 等. 参力胶囊抗辐射作用实验研究[J]. *中医药导报*, 2020, 26(15): 36-39.
- WANG J, LI L, MA S B, et al. Experimental study on the anti-radiation effect of shenli capsule [J]. *Guiding Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2020, 26(15): 36-39.
- [62] HU B, LIU X X, ZHANG C L, et al. Food macromolecule based nanodelivery systems for enhancing the bioavailability of polyphenols[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2017, 25(1): 3-15.
- [63] YI J J, CHENG C L, LI S B, et al. Preparation optimization and protective effect on  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  radiation damage of *Pinus koraiensis* pinecone polyphenols microspheres [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 113: 583-591.
- [64] GUO S Y, ZHAO Y Y, LUO S Z, et al. Encapsulation of curcumin in soluble soybean polysaccharide-coated gliadin nanoparticles: Interaction, stability, antioxidant capacity, and bioaccessibility [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(12): 5121-5131.
- [65] LIU Y Q, LIU K K, WANG X L, et al. Co-assembling nanoparticles of asiatic acid and caffeic acid phenethyl ester: Characterization, stability and bioactivity[J]. *Food Chemistry*, 2023, 402: 134409.
- [66] HAN Y, ZHANG H, ZHAO H T, et al. Nanoparticle encapsulation using self-assembly abietic acid to improve oral bioavailability of curcumin[J]. *Food Chemistry*, 2024, 436: 137676.
- [67] XIONG K, ZHOU L Y, WANG J Y, et al. Construction of food-grade pH-sensitive nanoparticles for delivering functional food ingredients [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 96: 102-113.
- [68] YU W M, ZHAO Y, JIA P H, et al. Preparation and evaluation of gastrodin microsphere-loaded *Gastrodia elata* polysaccharides composite hydrogel on UVB-induced skin damage *in vitro* and *in vivo*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 277: 134303.
- [69] 曲敏, 陈强, 孙冰玉, 等. 多酚的功能性质及与蛋白质、多糖相互作用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(11): 405-413.
- QU M, CHEN Q, SUN B Y, et al. Advances in studies on the functional properties of polyphenols and their interactions with proteins and polysaccharides[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(11): 405-413.
- [70] 陈南, 陈龙, 何强, 等. 茶多酚对小麦淀粉理化特性和面包品质的影响及机理[J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 8-16.
- CHEN N, CHEN L, HE Q, et al. Effects of tea polyphenols on physicochemical properties of wheat starch and bread quality and their action mechanism [J]. *Food Science*, 2021, 42(21): 8-16.

## Research Progress on Radiation-protective Functional Foods

LIU Yongqi<sup>1</sup>, GAO Hang<sup>1,2</sup>, YAN Xiangjun<sup>3</sup>, MA Ding<sup>2</sup>, SONG Jingxin<sup>1</sup>, ZHU Jiaqing<sup>2</sup>, LU Jike<sup>2\*</sup>, HAO Limin<sup>1\*</sup>

*(<sup>1</sup>Quartermaster Engineering Technology Research Department, Systems Engineering Institute, Academy of Military Sciences of the People's Liberation Army, Beijing 100010*

*<sup>2</sup>School of Life Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001*

*<sup>3</sup>People's Liberation Army Unit 96951, Beijing 100010)*

**Abstract** Ionizing radiation (IR) refers to the general term of radiation which can cause ionization of substances, and can penetrate the tissues of the body and cause direct damage to DNA, lipids, proteins and other biological macromolecules. IR can also ionize water molecules to produce reactive oxygen radicals, inducing oxidative damage. Radiation-protective functional foods refer to a category of functional foods primarily formulated with bioactive components such as polyphenols, polysaccharides, and saponins as functional base materials. These foods aim to protect the body's hematopoietic system, immune system, reproductive system, and other critical systems, serving to alleviate radiation-induced damage. Currently, while numerous radiation-protective functional base materials have been reported, only a limited variety are utilized in such functional foods. Furthermore, existing products predominantly adopt traditional formats like capsules and compound decoctions, highlighting an urgent need to diversify product forms. The development of novel radiation-protective functional foods using engineered food formats as carriers holds great promise. This study reviews the types and protective effects of radiation-protective functional ingredients, the current status of radiation-protective functional food development, and proposes the future direction for this category of functional foods. This work aims to provide reference for promoting the development and application of radiation-protective functional foods.

**Keywords** ionizing radiation; radiation protection; functional base material; functional food; engineered food