

低剂量电离辐射长期暴露对人体健康影响研究进展

Research progress on the health effects of long-term exposure to low-dose ionizing radiation

李秀婷¹, 胡晓江¹, 董秋², 俞敏¹, 涂雷², 王博深³, 赵亮亮³, 曹影⁴, 张红兵³

LI Xiuting¹, HU Xiaojiang¹, DONG Qiu², YU Min¹, TU Lei², WANG Boshen³,

ZHAO Liangliang³, CAO Ying⁴, ZHANG Hongbing³

1. 江苏卫生健康职业学院, 江苏 南京 210000; 2. 南京市职业病防治院, 江苏 南京 210042;

3. 江苏省疾病预防控制中心, 江苏 南京 210000; 4. 淮安市第二人民医院, 江苏 淮安 223000

摘要:随着电离辐射在医学等领域的广泛应用,长期职业接触低剂量电离辐射对人体的远期健康影响受到越来越多的关注。通过分析国内外对低剂量电离辐射的研究成果,总结了低剂量电离辐射对人体甲状腺、免疫系统、眼晶状体、肝脏、血液系统、生殖系统等方面的影响,各研究结论虽存在差异,但低剂量电离辐射对于人体健康的影响不容忽视。应创建完善的健康监护机制,不断改进工作环境,降低放射工作人员受照剂量;放射工作人员应切实做好职业防护,严格遵守操作规程,提升自我防护意识。

关键词:低剂量;电离辐射;甲状腺;免疫系统;癌症;眼晶状体;肝脏;血液系统

中图分类号: R146; X591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-1326(2023)05-0652-05

引用:李秀婷,胡晓江,董秋,等. 低剂量电离辐射长期暴露对人体健康影响研究进展[J]. 职业卫生与应急救援, 2023, 41(5): 652-656.

近年来随着电离辐射的广泛应用和医疗事业的不断发展,接触放射性工作的专业人员逐年增加。一般来说,照射事故中大剂量电离辐射多见,而低剂量电离辐射(low-dose ionizing radiation, LDIR)暴露往往见于放射工作人员职业接触,且 LDIR 极少引起短期内严重的急性辐射损伤效应,但长期职业接触 LDIR 对机体远期健康的影响正受到越来越多学者关注,逐渐成为放射防护领域研究的热点^[1]。LDIR 是指剂量低于 0.2 Gy,剂量率不超过 0.1 mGy/min 的 X 和 γ 射线外照射剂量^[2],其中剂量率为 1 h 或 1 h 以上的平均剂量,在实验研究中通常指 0.5 Gy 以下的辐射。虽然放射工作人员在职业活动中有防护装备,但辐射致癌的风险是存在的,并且可能增加放射防护负担,成为威胁放射工作人员健康的重要公共卫生问题。目前 LDIR 对职业人群健康影响

的研究尚存争议,LDIR 累积有效剂量对放射工作人员健康指标的剂量-反应关系尚不明确,长时间 LDIR 的风险评估仍处于争论之中。本文综述了国内外对 LDIR 的研究成果,探索 LDIR 长期接触所导致的人群健康效应,分析 LDIR 长期接触对人体各器官和系统的影响,为研究 LDIR 引起机体健康效应的机制及针对性的防护策略研究提供依据。

1 对甲状腺功能的影响

甲状腺是人体最大的内分泌腺体,极易受到电离辐射的影响。近年来放射工作人员甲状腺疾患的发病率逐年上升,有学者提出长期接触 LDIR 可引起医疗职业人群的甲状腺损伤,且甲状腺功能异常的风险随放射工龄及暴露剂量增加而增高^[3-4]。鲁碧峰等^[5]收集 1 039 名医务人员作为调查对象,分为暴露组(放射工作人员)和对照组(非放射工作人员),logistic 回归分析结果显示:放射工作人员年龄越大,甲状腺功能异常的风险越高;年累积剂量越大,甲状腺功能异常的风险也越高。杨勇等^[6]收集放射工作人员体检资料 6 702 份,发现其中放射工作人员甲状腺结构异常发生率达 51.4%,LDIR 引起

基金项目:江苏省卫健委科研项目(Z2019009);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(22KJB330004);江苏省卫生健康职业技术教育研究课题(WJZ202110);江苏卫生健康职业学院校级科研项目(重大项目)(JKA202202);江苏卫生健康职业学院校级科研项目(JKD2021015)

作者简介:李秀婷(1987—),女,博士,讲师

通信作者:张红兵,副主任医师, E-mail: eye00@126.com

放射工作人员甲状腺结构损伤,尤其是女性、高年龄、高工龄放射工作人员。Wong Y S 等^[7]对医疗系统放射工作人员的队列研究发现,LDIR 长期暴露后(12 年)机体出现血清 T₃、T₄ 水平的降低。Cioffi D L 等^[8]研究发现 LDIR 明显影响游离三碘甲状腺素(FT₃)、游离甲状腺素(FT₄)及促甲状腺激素(TSH)水平,使医护人员甲状腺功能减退的风险增加。而王莉莉等^[9]研究只发现 FT₄ 与年龄有较弱的相关性,且不同工龄、剂量、工种间的 FT₃、FT₄、TSH 水平和异常率差异无统计学意义。陈海翔等^[10]也提出 LDIR 长期暴露影响放射工作者的甲状腺功能,但并未增加甲状腺结节等甲状腺患病率,并非是诱导甲状腺疾病发生的原因。以上文献研究结果显示 LDIR 可能会导致甲状腺功能异常、结构损伤、激素水平变化等,但并不一定会增加甲状腺疾病的风险。不同的研究之间存在差异,估计可能与研究对象、方法、指标、剂量等因素有关。总之,LDIR 对甲状腺的影响值得关注,但还需要更多的证据来验证。

2 对免疫系统的影响

电离辐射以多种方式作用于免疫系统,反映了免疫系统本身的复杂性^[11]。暴露于电离辐射的炎性巨噬细胞具有调控连续免疫反应的潜能,而电离辐射使巨噬细胞诱导 T 细胞增殖的能力减弱^[12]。Kiselev 等^[13]研究发现放射工作人员中出现明显的 IgE 水平升高,提示低剂量电离辐射可能导致体液免疫失衡。Karimi 等^[14]研究提示暴露在低剂量电离辐射下的工人的免疫系统从 2 型反应转变为 1 型反应,以促进细胞免疫。Persa 等^[15]通过体外实验发现 LDIR 可引起小鼠脾脏功能性改变,同时 LDIR 暴露可激发体内抗原摄取、降低抗原递质作用。而刘晓畅等^[16]进行动物实验发现,长期 LDIR 暴露使脾脏和胸腺组织内免疫细胞、免疫分子、抗氧化蛋白都经历数量先下降、后上升最后表达趋于正常稳定的趋势,提示 LDIR 最初会造成机体免疫系统功能紊乱、免疫调节异常,但随着时间的延长,机体可通过自身免疫调节能力使免疫系统恢复正常。Candeias S M 等^[17]认为 LDIR 可通过上调 T 细胞表面 TCR/CD3 的表达,促进 T 淋巴细胞的增殖反应性,从而增强 CD4⁺Th 细胞(辅助性 T 细胞)及 CTL 细胞(细胞毒性 T 细胞)的应答性。但是刘东仁等^[18]研究却提出,LDIR 对机体免疫系统虽有一定程度的影响,但机体的免疫应答系统的表现无明显的规律性,且免疫细胞凋亡与低剂量辐射之间是无明确的适应性反应。只有在高剂量 X 线刺激后,机体的免

疫应答才表现出较为一致性的趋势,主要表现为 T 淋巴细胞(CD3)表达的降低和介导 T 细胞凋亡因子(FAS)表达的升高,以及晚期凋亡的抑制。综上,LDIR 会影响免疫细胞的数量、结构、功能、反应性等,但研究对象、方法、指标、剂量等因素的差异,会导致结果的差异。LDIR 对免疫系统的影响是复杂的,需要更多的研究加以证实。

3 对眼晶状体功能的影响

眼晶状体是对电离辐射最敏感的人体组织之一,尤其是晶体囊下的上皮细胞^[19]。受到辐射作用后,正常的晶状体纤维组织不能正常发育,逐渐变为浑浊,甚至形成白内障^[20]。现有研究多用晶状体浑浊率反映 LDIR 对眼部造成的损伤^[21]。李洁清等^[22]对于医学介入放射工作人员眼晶状体浑浊情况的分析发现,LDIR 长期暴露造成介入放射工作人员眼晶状体浑浊率增高。Little M P 等^[23]研究发现,机体患白内障风险随累积 5 年吸收剂量的增加而增加。Azizova T V 等^[24]对于俄罗斯 22 377 名放射工作人员进行队列研究发现,LDIR 慢性职业暴露使皮质性白内障、核性白内障、后囊膜下白内障这 3 种发病风险增加,且在女性中发病风险更高。张素芬等^[25]提出年龄、放射工龄、职业类别是眼晶状体浑浊的影响因素,他们将广东省 60 家医院的 1 501 名放射工作人员作为研究对象,发现眼晶状体浑浊检出率随着年龄、放射工龄、吸收剂量增加呈线性递增趋势。但是, Little M P 等^[26]在后来的研究中并不认为白内障的发生与 LDIR 暴露有关联,眼部其他疾患(特别是青光眼和视网膜黄斑变性)与 LDIR 暴露的关联也缺乏科学证据,他们结合以往研究认为只有剂量 > 5 Gy 的电离辐射暴露才可引起的青光眼,组织反应的特征也是如此。Dalke C 等^[21]动物实验也证实,晶状体浑浊随剂量增加的增长率约为 1%,故临床意义不大,而且相比于其他剂量组,LDIR 暴露组的小鼠在生命周期中出现晶状体浑浊的比率增幅也不大。综上,LDIR 对医疗职业人群眼晶状体的影响更可能表现为长期效应,导致眼晶状体浑浊、白内障等,但也有一些研究认为 LDIR 对眼部的损伤不明显或不具有临床意义,可能是因为剂量、暴露时间等原因。

4 对骨髓造血功能的影响

骨髓对电离辐射较敏感,当受照剂量超过人体耐受水平时,外周血细胞计数较早发生改变^[27]。关于放射工作人员因长期 LDIR 暴露可能影响外周血

象的报告较多,长期 LDIR 暴露的职业人群血小板、白细胞、血红蛋白异常率增高^[28]。Guo J J 等^[29]研究发现 LDIR 暴露条件下,机体外周血红细胞计数先下降后增加,然后随着电离辐射剂量的增加再次下降,而血小板计数的变化曲线与之相反,并且红细胞、血小板、血红蛋白计数与累积照射剂量呈非线性的剂量-反应关系。Liu N 等^[1]通过前瞻性队列研究甚至发现,即使短时间暴露在 LDIR 环境中,也可使外周血血小板计数先增长后降低,并且血小板计数的改变与外照射剂量呈剂量-反应关系。林秋月等^[30]研究发现,放射工作人员的血红蛋白、血小板水平降低,且红细胞分布宽度升高。但也有学者不赞同上述观点,认为长期低剂量电离辐射对放射工作人员外周血细胞的影响不大^[31]。王桂等^[32]研究并未发现不同工种和工龄放射工作人员血细胞计数差异有统计学意义($P > 0.05$),而且在相同暴露及防护条件下,长期累积辐射剂量与血细胞参数无明显相关性。

5 对肝脏功能的影响

肝脏是人体的主要代谢器官,具有分泌胆汁、新陈代谢、解毒等功能,肝脏对射线较为敏感。叶淑敏等^[33]分析医疗机构放射工作人员的肝肾功能,结果发现接触组谷丙转氨酶(ALT)、尿素氮(BUN)、肌酐(CR)水平均高于对照组,提示 LDIR 长期暴露对放射工作人员肝肾功能有一定损伤,且谷氨酰转肽酶(GGT)、BUN 水平随着年龄和工龄增长而逐渐增高,呈累积性效应。Sun 等^[34]对 508 名工业放射技师(年有效剂量 < 20 mSv)和 2 156 名非接触工人进行为期 3 年的队列研究,根据谷丙转氨酶(ALT)和谷草转氨酶(AST)水平评估肝损伤发生率,结果发现,长期暴露 LDIR 是肝损伤的危险因素($RR = 2.23$; $95\%CI: 1.53 \sim 3.25$)。吴圻荣等^[35]对 193 名连续 10 年接触 LDIR 的放射工作人员和 225 名健康成人的 ALT、AST、白蛋白(ALB)水平进行分析,结果提示 LDIR 长期接触的放射工作人员的肝功能指标会受到一定影响,且对男性影响大于女性。尤佳恺等^[36]对 2007—2016 年上海市闵行区 8 273 例放射工作人员的职业健康状况进行分析,发现放射工作人员肝功能异常率为 6.53%,不同性别肝功能异常率的差异存在统计学意义,且男性高于女性($P < 0.01$)。而任欣等^[37]现况调查研究只观测到介入工作医务人员的肝肾功能受电离辐射影响较大,ALT、AST 等指标显著上升,但并未观察到长期接触 LDIR 对肝肾功能产生显著影响。总体来说,现有研究支持长

期低剂量辐射暴露能导致肝功能损害,但是个体差异较大,还需进一步研究证实长期低剂量辐射的肝毒性的作用机制。

6 对癌症风险的影响

LDIR 暴露引起放射工作人员癌症发生的相关研究主要集中在甲状腺、乳腺、骨髓造血系统等辐射敏感部位,多项研究^[38-43]证实 LDIR 暴露与甲状腺癌、乳腺癌、白血病等发病密切相关。然而,低剂量辐射的癌症风险评估仍然存在争议和不确定性^[44]。英国一项包括 173 081 名放射工作人员的队列研究^[45]发现,暴露在平均累积剂量为 25.5 mSv 环境下的男性劳动者中白血病发生风险随累积剂量增加而升高[每单位剂量的相对风险增量(excess relative risk per sievert, ERR/Sv) = 1.38 , $90\%CI: 0.04 \sim 3.24$]。Kuznetsova 等^[46]对 1948—2004 年间雇佣的 22 373 名放射作业工人进行队列研究发现,在 LDIR 暴露后 2 ~ 5 年,急性髓性白血病(acute myeloid leukemia, AML)发病风险显著增高($ERR/Gy = 38.40$, $90\%CI: 13.92 \sim 121.4$),随后风险大幅降低,但仍具有统计学意义($ERR/Gy = 2.63$, $90\%CI: 0.07 \sim 12.55$)。Zielinski 等^[47]对加拿大医务工作者中放射工作人员的职业辐射剂量与甲状腺癌发病率之间的相关性进行研究,发现甲状腺癌发病率显著升高,合并标准化发病率(standardized incidence ratios, SIR)为 1.74($90\%CI: 1.40 \sim 2.10$)。但 Kitahara 等^[48]的前瞻性研究并未发现 LDIR 暴露与甲状腺癌发病风险增加有关。Richardson D B 等^[49]对于 30 余万名放射工作人员的队列研究发现,LDIR 与食管癌、结肠癌、胰腺癌等实体肿瘤也有一定关联。Akiba S 等^[50]队列研究也指出,暴露在 LDIR 条件下,放射工作人员发生除白血病之外的实体肿瘤的相对危险度为 1.26。

7 对其他方面的影响

张欣等^[51]通过 meta 分析定量分析评价了长期暴露在 LDIR 环境下放射工作人员心电图的变化,研究发现放射组与对照组心电图异常率差异有统计学意义($P < 0.05$),放射工作者心电图异常的危险性更高。杨春旺等^[52]调查发现 LDIR 可影响心脏功能,导致心电图异常,且对男性的影响高于女性。Tian X L 等^[53]对放射工作人员相关资料分析发现,长期接触 LDIR 后机体内双链加环染色体、核质环桥和微核可被激发。其中,核质环桥可作为评价 LDIR 职业暴露健康风险的潜在生物标志。此外,动物实验发现 LDIR 长期暴露可能导致生殖细胞突

变,引起后代先天性畸形等^[54-56]。但是马红京等^[57]选择 LDIR 作业 5 年以上官兵为观察组,未从事电离辐射作业者为对照组,比较两组肾功能 3 项、淋巴细胞微核率等,均未发现差异有统计学意义($P > 0.05$)。

综上所述,LDIR 长期暴露可能会损伤人体甲状腺、免疫系统、肝脏、眼晶状体、血液系统等多个部位,LDIR 暴露对于人体健康影响不容忽视。研究结论存在的差异,可能与各项研究涉及的人群选择、样本量、累积照射剂量及数据资料的分析方法等差异有关。未来有关 LDIR 长期暴露的研究需充分考虑遗传背景及其他混杂因素的影响,以进一步探讨其健康效应。应创建完善的健康监护机制,不断改进工作环境,定期进行职业健康检查和剂量监测,有效降低放射工作人员受照剂量;放射工作人员应切实做好职业防护,严格遵守操作规程,提升自我防护意识。

作者声明 本文无实际或潜在的利益冲突

参考文献

- [1] LIU N, PENG Y, ZHONG X, et al. Effects of exposure to low-dose ionizing radiation on changing platelets: a prospective cohort study[J]. *Environ Health Prev Med*, 2021, 26(1): 14.
- [2] TANG F R, LOGANOVSKY K. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human [J]. *J Environ Radioact*, 2018, 192: 32-47.
- [3] 冯春燕, 王立颖. 长期低剂量电离辐射对医务人员甲状腺的影响[J]. *职业卫生与应急救援*, 2020, 38(1): 41-43.
- [4] HONG J Y, HAN K, JUNG J H, et al. Association of exposure to diagnostic low-dose ionizing radiation with risk of cancer among youths in South Korea [J]. *JAMA Netw Open*, 2019, 2(9): e1910584.
- [5] 鲁碧峰, 殷文军, 徐甜, 等. 低剂量 X 射线电离辐射与放射工作人员甲状腺功能的相关分析 [J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2022, 40(10): 733-736.
- [6] 杨勇, 王强, 俞爱青, 等. 低剂量电离辐射对放射工作人员甲状腺的影响[J]. *中国卫生检验杂志*, 2022, 32(3): 354-358.
- [7] WONG Y S, CHENG Y Y, CHENG T J, et al. The relationship between occupational exposure to low-dose ionizing radiation and changes in thyroid hormones in hospital workers [J]. *Epidemiology*, 2019, 30(Suppl 1): S32-S38.
- [8] CIOFFI D L, FONTANA L, LESO V, et al. Low dose ionizing radiation exposure and risk of thyroid functional alterations in healthcare workers[J]. *Eur J Radiol*, 2020, 132: 109279.
- [9] 王莉莉, 刘继文. 低剂量电离辐射对放射工作人员甲状腺功能的影响[J]. *中国工业医学杂志*, 2021, 34(2): 147-148.
- [10] 陈海翔, 李都. 长期低剂量电离辐射对医务人员甲状腺的影响[J]. *中国乡村医药*, 2020, 27(12): 47-48.
- [11] LUMNICZKY K, IMPENS N, ARMENGOL G, et al. Low dose ionizing radiation effects on the immune system[J]. *Environ Int*, 2021, 149: 106212.
- [12] WUNDERLICH R, RUHLE P F, DELOCH L, et al. Ionizing radiation reduces the capacity of activated macrophages to induce T-cell proliferation, but does not trigger dendritic cell-mediated non-targeted effects[J]. *Int J Radiat Biol*, 2019, 95(1): 33-43.
- [13] KISELEV S M, SOKOLNIKOV M E, LYSS L V, et al. Immunological monitoring of the personnel at radiation hazardous facilities[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2017, 173(1-3): 124-130.
- [14] KARIMI G, BALALI-MOOD M, ALAMDARAN S A, et al. Increase in the Th1-cell-based immune response in healthy workers exposed to low-dose radiation - immune system status of radiology staff [J]. *J Pharmacopuncture*, 2017, 20(2): 107-111.
- [15] PERSA E, SZATMARI T, SAFRANY G, et al. In vivo irradiation of mice induces activation of dendritic cells [J]. *Int J Mol Sci*, 2018, 19(8): 2391.
- [16] 刘晓畅. 低剂量辐射对小鼠免疫系统的功能影响及机制研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
- [17] CANDEIAS S M, MIKA J, FINNON P, et al. Low-dose radiation accelerates aging of the T-cell receptor repertoire in CBA/CA mice[J]. *Cell Mol Life Sci*, 2017, 74(23): 4339-4351.
- [18] 刘东仁. 山东省放射工作人员细胞免疫功能现状研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
- [19] 冯海涛. 低剂量电离辐射流行病学研究进展 [J]. *职业与健康*, 2021, 37(23): 3310-3312.
- [20] AINSBURY E A, BARNARD S. Sensitivity and latency of ionising radiation-induced cataract[J]. *Exp Eye Res*, 2021, 212: 108772.
- [21] DALKE C, NEFF F, BAINS S K, et al. Lifetime study in mice after acute low-dose ionizing radiation: a multifactorial study with special focus on cataract risk [J]. *Radiat Environ Biophys*, 2018, 57(2): 99-113.
- [22] 李洁清, 毛雪松, 马娅, 等. 介入放射工作人员眼晶状体健康状况调查[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28(5): 485-486.
- [23] LITTLE M P, CAHOON E K, KITAHARA C M, et al. Occupational radiation exposure and excess additive risk of cataract incidence in a cohort of US radiologic technologists [J]. *Occup Environ Med*, 2020, 77(1): 1-8.
- [24] AZIZOVA T V, HAMADA N, GRIGORYEVA E S, et al. Risk of various types of cataracts in a cohort of Mayak workers following chronic occupational exposure to ionizing radiation [J]. *Eur J Epidemiol*, 2018, 33(12): 1193-1204.
- [25] 张素芬, 刘小莲, 王恰, 等. 广东省医学放射工作人员眼晶状体异常影响因素分析 [J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2022, 42(10): 771-778.
- [26] LITTLE M P, AZIZOVA T V, HAMADA N. Low- and moderate-dose non-cancer effects of ionizing radiation in directly exposed individuals, especially circulatory and ocular diseases: a review of the epidemiology[J]. *Int J Radiat Biol*, 2021, 97(6): 782-803.
- [27] HEYDARHRYDARI S, HAGHPARAST A, EIVAZI M T. A novel biological dosimetry method for monitoring occupational radiation exposure in diagnostic and therapeutic wards: from radiation dosimetry to biological effects [J]. *J Biomed Phys Eng*, 2016, 6

- (1):21-26.
- [28] 王雷,钟媛,何明艳,等. 小剂量电离辐射对职业人群血细胞影响的 Meta 分析 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2018,36(3):44-53.
- [29] GUO J J, LIU N, MA Z, et al. Dose-response effects of low-dose ionizing radiation on blood parameters in industrial irradiation workers [J]. Dose Response, 2022, 20 (2): 1495855647.
- [30] 林秋月,丘丛玺,李燕茹,等. 广州市低剂量电离辐射对放射工作人员外周血细胞影响 [J]. 职业卫生与应急救援, 2018,36(3):233-235.
- [31] 张欣,赵永成. 低剂量电离辐射对放射工作人员外周血细胞影响的 Meta 分析 [J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(4): 406-409.
- [32] 王桂,李世霞,陈玥,等. 低剂量电离辐射对放射工作人员外周血细胞参数的影响 [J]. 国际生物医学工程杂志, 2022, 45(1): 52-57.
- [33] 叶淑敏,刘莉. 849 名医院放射工作人员肝肾功能状况调查 [J]. 中国当代医药, 2021, 28(18): 168-172.
- [34] SUN Q, MAO W, JIANG H, et al. The effect of protracted exposure to radiation on liver injury: a cohort study of industrial radiographers in Xinjiang, China [J]. Int J Environ Res Public Health, 2018, 15(1): 71.
- [35] 吴圻荣,吴智君,付远亮,等. 2010—2019 年茂名 193 名放射工作人员肝功能水平回顾调查 [J]. 临床检验杂志 (电子版), 2020, 3(9): 435-436.
- [36] 尤佳恺,陈丽,应圣洁,等. 2007—2016 年上海市闵行区放射工作人员健康状况调查 [J]. 现代预防医学, 2018, 45(11): 1948-1951.
- [37] 任欣,常炳庆,汪晓,等. 长期低剂量电离辐射对放射线暴露医务人员肝肾功能的影响 [J]. 中国现代医药杂志, 2022, 24(6): 31-34.
- [38] HAUPTMANN M, DANIELS R D, CARDIS E, et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: summary bias assessment and meta-analysis [J]. J Natl Cancer Inst Monogr, 2020(56): 188-200.
- [39] FRIEDMAN-JIMENEZ G, KATO I, FACTOR-LITVAK P, et al. Low-dose ionizing radiation and cancer mortality among enlisted men stationed on nuclear-powered submarines in the United States Navy [J]. Int J Radiat Biol, 2022, 98(10): 1542-1550.
- [40] BERRINGTON D G A, DANIELS R D, CARDIS E, et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: rationale and framework for the monograph and overview of eligible studies [J]. J Natl Cancer Inst Monogr, 2020, 2020(56): 97-113.
- [41] WANG X C, TIAN L L, FAN C X, et al. The adaptive responses in non-small cell lung cancer A549 cell lines induced by low-dose ionizing radiation and the variations of miRNA expression [J]. Dose Response, 2021, 19(4): 1485789883.
- [42] LUBIN J H, ADAMS M J, SHORE R, et al. Thyroid cancer following childhood low-dose radiation exposure: a pooled analysis of nine cohorts [J]. J Clin Endocrinol Metab, 2017, 102(7): 2575-2583.
- [43] NIKKILA A, RAITANEN J, LOHI O, et al. Radiation exposure from computerized tomography and risk of childhood leukemia: finnish register-based case-control study of childhood leukemia (FRECCLE) [J]. Haematologica, 2018, 103(11): 1873-1880.
- [44] YASSER F A, CUCINOTTA F A, NING-ANG L, et al. Cancer risk of low dose ionizing radiation [J]. Sec Medical Physics and Imaging, 2020, 188(8): 1552-1562.
- [45] GILLIES M, HAYLOCK R, HUNTER N, et al. Risk of leukemia associated with protracted low-dose radiation exposure: updated results from the national registry for radiation workers study [J]. Radiat Res, 2019, 192(5): 527-537.
- [46] KUZNETSOVA I S, LABUTINA E V, HUNTER N. Radiation risks of leukemia, lymphoma and multiple myeloma incidence in the MAYAK cohort: 1948-2004 [J]. PLoS One, 2016, 11(9): e162710.
- [47] ZIELINSKI J M, GARNER M J, BAND P R, et al. Health outcomes of low-dose ionizing radiation exposure among medical workers: a cohort study of the Canadian national dose registry of radiation workers [J]. Int J Occup Med Environ Health, 2009, 22(2): 149-156.
- [48] KITAHARA C M, PRESTON D L, NETA G, et al. Occupational radiation exposure and thyroid cancer incidence in a cohort of U S radiologic technologists, 1983-2013 [J]. Int J Cancer, 2018, 143(9): 2145-2149.
- [49] RICHARDSON D B, CARDIS E, DANIELS R D, et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (NWORKS) [J]. BMJ, 2015, 351: h5359.
- [50] AKIBA S, MIZUNO S. The third analysis of cancer mortality among Japanese nuclear workers, 1991-2002: estimation of excess relative risk per radiation dose [J]. J Radiol Prot, 2012, 32(1): 73-83.
- [51] 张欣,孙志娟,赵永成. 长期低剂量电离辐射对工作人员心电图影响的 Meta 分析 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2016, 34(4): 29-33.
- [52] 杨春旺,颜玲. 山东省部分放射工作人员职业健康状况调查 [J]. 中国辐射卫生, 2019, 28(2): 123-128.
- [53] TIAN X L, LU X, CAI T J, et al. Cytogenetic monitoring of peripheral blood lymphocytes from medical radiation professionals occupationally exposed to low-dose ionizing radiation [J]. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen, 2021, 867: 503370.
- [54] 赵颖. 低剂量电离辐射导致雄性小鼠生殖系统损伤的机制研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [55] QU N, ITOH M, SAKABE K. Effects of chemotherapy and radiotherapy on spermatogenesis: the role of testicular immunology [J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(4): 957.
- [56] LIU X, CHEN Q, DING X, et al. X-ray-induced reproductive dysfunction and differentially expressed piRNAs in male mice [J]. Hum Exp Toxicol, 2019, 38(5): 533-546.
- [57] 马红京,刘建红,张素香,等. 某部长期低剂量电离辐射作业官兵体检结果分析 [J]. 人民军医, 2018, 61(2): 111-114.

收稿日期: 2023-04-07