

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.018

· 综 述 ·

低剂量电离辐射长期接触健康效应研究进展

陈湃韩^{1,2}, 陈慧峰¹, 邹剑明¹

1. 广东省职业病防治院, 广东省职业病防治重点实验室, 广东 广州 510300;

2. 中山大学公共卫生学院, 广东 广州 510080

摘要: 随着核能的发展及电离辐射的广泛应用, 接触低剂量电离辐射的职业人群和公众越来越多, 低剂量电离辐射接触对人群健康效应包括致癌、非致癌等研究成为公共卫生领域研究的热点。低剂量电离辐射引起的各种生物效应主要取决于辐射的物理性质、接触时间、剂量和剂量率等。目前关于低剂量电离辐射长期接触对人群的健康效应研究结论尚无一致共识。本文就国内外关于低剂量电离辐射长期接触的健康效应研究进行回顾, 为低剂量电离辐射长期接触人群的健康效应、影响机制及防护策略研究等提供科学基础。

关键词: 低剂量电离辐射; 长期接触; 健康效应

中图分类号: X591 文献标识码: R 文章编号: 1004-714X(2022)01-0099-06

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

CHEN Paihan^{1,2}, CHEN Huifeng¹, ZOU Jianming¹

1. Guangdong Province Hospital for Occupational Disease Prevention and treatment, Guangdong Provincial Key Laboratory of Occupational Disease Prevention and treatment, Guangzhou 510300 China;

2. School of Public Health, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080 China

Abstract: With the development of nuclear energy and the wide application of ionizing radiation, more and more occupational populations and the public are exposed to low-dose ionizing radiation. Consequently, the research on human health effects of exposure to low-dose ionizing radiation, including carcinogenic and non-carcinogenic effects, have become a hot topic in the field of public health. The biological effects caused by low-dose ionizing radiation mainly depend on the physical property, duration, dose, and dose rate of ionizing radiation. At present, there is no consensus on the effects of long-term exposure to low-dose ionizing radiation on human health. This article reviews the research on the health effects of long-term exposure to low-dose ionizing radiation at home and abroad, and provides a scientific basis for research on the health effects, influence mechanism, and protection strategies of long-term exposure to low-dose ionizing radiation.

Keywords: Low-dose ionizing radiation; Long-term exposure; Health effect

Corresponding author: ZOU Jianming, E-mail: zjm990916@126.com

随着核能的发展及电离辐射的广泛应用, 低剂量电离辐射(Low-dose ionizing radiation, LDIR)长期接触的职业人群和公众日益增多, LDIR 对人群远期健康影响及其防护策略, 正成为全球范围内公共卫生领域研究的热点和焦点。LDIR 对人群健康效应影响主要包括致癌效应, 特异性靶器官疾病、心脑血管疾病等非致癌效应等。目前关于 LDIR 对人群健康效应研究较多, 但 LDIR 长期接触的人群健康效应研究尚无一致的结论^[1]。本文通过综述国内外关于 LDIR 长期

接触的人群健康效应研究, 阐明 LDIR 长期接触对机体健康效应的影响, 为 LDIR 长期接触人群健康效应机制及针对性防护对策研究提供科学依据。

1 低剂量电离辐射

根据联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)、国际辐射防护委员会(ICRP)等国际组织报道及文献综述, 低剂量/低剂量率定义为: 外照射剂量低于 200 mGy 或剂量率低于 0.1 mGy · min⁻¹(1 h 以

基金项目: 国家自然科学基金(81302387); 广东省职业病防治重点实验室(2017B030314152); 广东省自然科学基金(2019A1515011969); 广东省医学科研基金(A2017227、A2019246); 广州市科技计划项目(202002030031)

作者简介: 陈湃韩(1996—), 男, 广东汕头人, 硕士研究生在读, 从事低剂量电离辐射对人群健康影响研究, E-mail: chenpaihan@foxmail.com
通信作者: 邹剑明, E-mail: zjm990916@126.com

内或 1 h 以上的平均剂量率)的 X 或 γ 射线^[2-3]。随着社会发展,公众接触电离辐射的机会越来越多,接触途径主要包括核工业系统、射线发生器的生产和使用、天然放射性核素伴生或共生矿生产、医疗放射工作、科学研究等职业照射以及天然高本底、放射治疗等非职业照射。目前关于 LDIR 长期接触对人群健康的影响研究主要集中在核武器试验放射性尘埃、核电站事故、核污染、从事辐射相关工作及高本底地区的天然辐射中 LDIR 的人群健康效应。越来越多的证据表明, LDIR 长期接触产生的远期健康效应受到机体损伤修复机制等多方面因素影响,其结局往往需要很长时间才能显现,进一步增加了科学认识及正确评估 LDIR 健康效应的难度。

2 长期接触低剂量电离辐射对人群健康效应影响

2.1 致癌健康效应 LDIR 致癌相关的流行病学研究主要集中在辐射敏感部位发生的癌症,如白血病、甲状腺癌、乳腺癌、肺癌等。LDIR 与人群癌症发生的相关数据资料主要来源于核污染与核电站事故暴露人群、放射工作人员及高本底地区居民等人群的辐射流行病学研究结果。

2.1.1 白血病 白血病(不包括慢性淋巴细胞白血病)被认为是电离辐射最容易诱发的癌症,但低剂量电离辐射与白血病发病的相关研究尚无一致的结论。Daniels 等^[4]对 10 项关于长期暴露于低剂量 γ 射线导致白血病风险研究进行 meta 分析,结果显示,控制发表偏倚等影响后,暴露于 100 mGy 时白血病超额相对危险度(ERR)为 0.19(95%CI: 0.07~0.32),提示长期暴露于低剂量 γ 射线(100 mGy)可能与白血病有关。一项包括 173 081 名英国职业辐射接触工人队列(主要为 γ 射线,平均累积剂量为 25.5 mSv)研究发现,在男性工作者中白血病发生风险随累积剂量增加而升高(ERR/Sv = 1.38, 90%CI: 0.04~3.24)^[5]。Leuraud 等^[6]进行了一项纳入 30 余万在辐射岗位(主要为 γ 射线)工作 1 年以上工人的病例对照研究,发现该职业人群平均年累积剂量为 1.1 mGy,白血病死亡率的 ERR/Gy 为 2.96(90%CI: 1.17~5.21)。瑞士在 1990 年和 2000 年的人口普查中发现,暴露于剂量率 > 200 nSv/h 地区的儿童,患白血病的风险明显高于剂量率 < 100 nSv/h 地区的儿童[风险比(HR) = 2.04; 95%CI: 1.11~3.74]^[7]。但近年德国一项生态学研究调查结果未发现高本底地区儿童低剂量 γ 射线接触(年剂量率约为 0.5~1.5 mSv/年)与白血病发病率之间

的关系^[8]。上述研究结论不一致的原因可能在于接触射线种类、累积接触剂量、研究对象、样本量等不同;此外还由于辐射剂量的估算容易出现测量误差,从而影响研究结果。

2.1.2 甲状腺癌 暴露于电离辐射是甲状腺癌一个较明确的危险因素,但 LDIR 长期接触与甲状腺癌的关联性尚未明确。Lubin 等^[9]对 9 项关于低剂量辐射接触儿童甲状腺癌队列进行综合分析,发现在低剂量辐射(< 200 mGy)下,甲状腺辐射剂量和儿童甲状腺癌的发生存在线性相关关系,并肯定了“辐射防护最优化”原则。Zielinski 等^[10]曾对 1951—1987 年医务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,发现男性和女性医务人员的甲状腺癌发病率均显著升高,合并标准化发病率(SIR)为 1.74(90%CI: 1.40~2.10)。但 Kitahara 等^[11]进行了一项关于甲状腺累积低至中剂量职业性辐射暴露(平均剂量 57 mGy,范围 0~1 600 mGy)与甲状腺癌发病率的前瞻性研究,结果发现成年后长期低至中剂量的电离辐射暴露与甲状腺癌风险的增加无关。另外,也有研究提出虽然医疗放射工作者[累积甲状腺剂量,病例组:(9.9 ± 32.3) mSv;非病例组:(10.4 ± 41.6) mSv]的甲状腺癌发病率略高于普通人群,但无明显证据表明这一增加与职业辐射剂量有关^[12]。上述研究结论提示,不同的结论与辐射剂量有关,虽然较高剂量辐射与甲状腺癌有相关性,但仍未发现较低剂量的电离辐射与甲状腺癌明确的相关性。由于多数研究都存在一定的局限性,因此需要大规模的人群流行病学研究来证实 LDIR 与甲状腺癌之间的关系。同时,医务人员在临床操作过程中,应遵循最优化原则,采取合适的防辐射措施将诊断性辐射剂量降低到最小,尤其是对儿童患者。

2.1.3 肺癌 研究发现电离辐射接触增加了罹患肺癌的风险,但大部分研究没有正确控制吸烟这一混杂因素。原因在于大多数肺癌病例与吸烟有关,但仍有 25% 的病例发生在不吸烟的人群中。近年来有学者对 LDIR 和吸烟对肺癌发生风险的联合效应进行了研究,但长期 LDIR 暴露后患肺癌的风险尚不能完全明确。Velazquez-Kronen 等^[13]以 14 621 名马亚克工人(平均剂量为 120 mGy)作为调查对象进行研究,发现调整外部辐射剂量和吸烟后,钚引起肺癌的 ERR/Gy 随年龄的增长而降低,且女性高于男性。此外,该研究还发现钚剂量和吸烟对肺癌的联合效应大于相加效应,但小于相乘效应。Gilbert 等^[14]在一项

由 106 068 名美国放射工作人员组成的队列研究中(平均随访时间为 24 年),分析肺累积吸收剂量与肺癌死亡率的关系,并考虑吸烟这一潜在混杂效应,未观察到肺累积吸收剂量(平均剂量为 25 mGy)与肺癌死亡率之间的关联。鉴于肺癌的发病潜伏期较长且影响因素较多(如年龄、吸烟、性别等),后续的研究应关注吸烟等混杂因素在 LDIR 与肺癌相关性研究中的控制。

2.1.4 乳腺癌 电离辐射是引起女性乳腺癌的发病因素之一,但长期 LDIR 暴露对女性乳腺癌发病风险的研究尚少。早年 Pukkala 等^[15]曾进行了一项生态学研究,描述白俄罗斯和乌克兰受切尔诺贝利事故污染最严重地区乳腺癌发病率的时空趋势,发现切尔诺贝利事故发生后,所有地区的乳腺癌发病率均有所增加。1997—2001 年研究显示,受污染最严重的地区(平均累积剂量为 40.0 mSv 或更高)女性乳腺癌的发病风险是未受污染地区的 2 倍。但 Zupunski 等^[16]对切尔诺贝利事故发生后白俄罗斯(2016 年乳房平均累积剂量为 12.3 mGy)和乌克兰(5.7 mGy)污染最严重地区的乳腺癌发病率进行研究,未发现重度污染地区乳腺癌发生率高于低污染地区。Rivkind 等^[17]对切尔诺贝利核电站事故后长期暴露于 LDIR 的女性乳腺癌风险进行的病例对照研究发现,长期暴露于 LDIR(乳房平均辐射剂量为 1.3 cGy)会增加乳腺癌的风险,平均暴露剂量为 1.86 cGy 时乳腺癌发病风险是对照组的 3 倍(95%CI: 1.3~7.0)。目前有关长期 LDIR 暴露与乳腺癌之间的相关性仍处于探索阶段,后续的研究应重点关注低剂量辐射与乳腺癌发生的相关性及其发生机制。

2.2 非致癌健康效应

2.2.1 特异性靶器官疾病

2.2.1.1 眼晶状体损伤 眼晶状体是电离辐射敏感的人体组织之一。在职业人群和高本底地区居民的调查研究均发现长期接触 LDIR 可引起眼晶状体混浊甚至是白内障。杨非等^[18]对成都市 1 032 例放射工作人员累积剂量与眼晶状体损伤进行相关分析,发现控制性别、工种及年龄等混杂因素后,累积剂量超过 11.369 mSv 是眼晶状体损伤的主要危险因素($OR = 7.78$; 95% CI: 1.93~31.38),提示长期接触 LDIR 对放射工作人员眼晶状体有一定的损伤作用。介入放射工作人员在射线暴露下进行手术操作,增加了眼晶状体放射性损伤的潜在风险。研究也表明^[19-20],介入放射工作人员是放射性白内障的高危人

群,长期 LDIR 会造成介入放射工作人员眼晶状体混浊率增高。我国广东阳江高本底地区居民受照剂量明确且累积时间较长,是研究长期 LDIR 与眼晶状体损伤相关性的重要场所。王焱等^[21]调查发现对性别、年龄进行调整后,阳江高本底地区居民患白内障风险高于对照地区居民($OR = 2.93$; 95%CI: 1.19~7.17),提示长期 LDIR 可能是导致患白内障的重要危险因素;此外,高本底地区 < 60 岁组白内障的患病率显著高于对照地区,提示长期 LDIR 受照可能导致白内障的发生时间提前。目前大部分研究均支持长期 LDIR 对眼晶状体的损害效应,尤其是介入放射工作人员,应严格佩戴防护眼镜,以减少眼晶状体的辐射损伤,预防放射性白内障的发生。

2.2.1.2 甲状腺影响 甲状腺是电离辐射的重要靶器官,长期 LDIR 可引起职业人群或高本底地区居民甲状腺形态学变化和甲状腺功能障碍。有研究者^[22]对阳江高本底地区女性居民甲状腺超声检查结果进行分析,显示高本底地区甲状腺结节检出率(70.2%)显著高于对照地区(51.0%),同时提示长期 LDIR 可能增加实性甲状腺小结节发生的风险。近年大多数研究报告均提示长期 LDIR 对放射工作人员的甲状腺功能产生一定影响,但对于甲状腺功能指标研究尚无统一结论。陈海翔等^[23]对杭州市某医院长期接触 LDIR 的 80 名放射工作人员甲状腺结节及功能的研究显示,暴露组三碘甲状腺原氨酸(T₃)值高于对照组,甲状腺素(T₄)、促甲状腺激素(TSH)值低于对照组,差异均有统计学意义;虽然甲状腺结节患病率对照组为 58.8% 略高于观察组的 48.8%,但差异无统计学意义。吕扬阳等^[24]调查了广州市某医院 224 名放射工作人员甲状腺功能及结节的相关情况,结果显示暴露组 T₃、T₄ 和 TSH 均高于对照组,差异均有统计学意义;暴露组和对照组的甲状腺结节发病率差异无统计学意义。以上研究结论不一致的原因可能是:未考虑混杂因素(如缺碘或过量摄入碘等)的影响;研究设计多为横断面研究,缺少队列研究;相关作用机制尚未完全阐明。后续可在控制混杂因素的基础上建立放射工作人员随访队列研究,为放射工作人员甲状腺功能异常机制研究及针对性辐射防护对策研究提供依据。

2.2.1.3 肝功能异常 肝脏是对射线较为敏感的器官之一,LDIR 可能通过损伤肝细胞或使肝脏合成蛋白减少,从而影响肝功能的异常。妥娅等^[25]对多项关于 LDIR 与放射工作人员(工龄范围 8.5~24 年)肝功

能指标相关性研究进行 meta 分析, 结果显示放射工作人员组发生肝功能异常的风险为对照组 1.59 倍 (95% *CI*: 1.25~2.02), 提示长期暴露于 LDIR 环境的放射工作人员肝功能异常检出率增高。Sun 等^[26]一项包括 508 名工业放射技师(年有效剂量 < 20 mSv) 和 2 156 名非接触工人的队列研究结果发现, 控制混杂因素后, 与非接触组比较, 长期接触 LDIR 是肝损伤的危险因素($RR = 2.227$; 95% *CI*: 1.526~3.252)。陈香兰等^[27]进行某铀矿在岗工人辐射暴露与肝功能相关研究, 调查发现接触组 [平均年剂量 (4.44 ± 2.56) mSv] 总胆红素、间接胆红素异常率高于对照组 [平均年剂量 (1.83 ± 1.39) mSv], 差异具有统计学意义, 提示 LDIR 长期接触对肝脏功能可能有一定的影响。吴圻荣等^[28]对 2010—2019 年茂名 193 名放射人员肝功能水平进行回顾调查, 结果提示 LDIR 长期接触的放射工作人员的谷丙转氨酶、白蛋白等肝功能指标会受到一定影响; 该研究还发现接触 LDIR 对男性放射工作人员肝功能的影响较大, 原因可能在于个体存在辐射敏感性差异如男女之间内分泌、代谢状态等方面的不同引起^[29]。后续研究应重点关注控制潜在混杂因素(如年龄、性别、吸烟、饮酒等)后, 不同累积剂量接触对肝功能的影响, 以增加研究结果的说服力。

2.2.2 心脑血管疾病 高剂量辐射是心血管疾病的危险因素, 受到 0.5 Sv 电离辐射照射 10 年后, 大约有 1% 的受照个体会发生心脑血管疾病^[30], 但长期暴露于 LDIR 导致心脑血管疾病的发病风险仍需更多研究来确证。研究显示 1948—1982 年 Mayak 生产协会职工脑血管疾病发病率与职工受到的 γ 外照射及沉积于肝脏的内照射剂量相关, 其 *ERR*/Gy 分别为 0.46 (95% *CI*: 0.37~0.57) 和 0.25 (95% *CI*: 0.16~0.42); 受到 γ 外照射剂量 > 100 mSv 及肝脏沉积内照射剂量 > 10 mSv 的职工与外照射较低的职工相比, 脑血管疾病发病率明显升高^[31]。Rajaraman 等^[32]对从事介入手术的医疗工作人员循环系统疾病发病和死亡风险进行了评估, 与对照组相比, 介入工作人员中风发病率增加了 34% ($HR = 1.34$; 95% *CI*: 1.10~1.64)。此外, 研究发现接触人群死亡率升高与 LDIR 诱发心血管疾病等有关^[33]。但也有研究在调整年龄和主要混杂因素后, 未发现长期 LDIR 暴露 [年平均有效剂量 (1.81 ± 0.23) mSv/年] 对 50 岁以上女性人群的心-踝血管指数有显著影响, 提示女性长期暴露于 LDIR 可能对其动脉血管硬化无明显影响, 尚

需大量权威的人群流行病学研究证据支持^[34]。此外, 一项关于宫内受照的成人健康研究(平均随访 18.4 年)发现, 与对照组相比, 宫内受照者(平均子宫吸收剂量 100 mSv)中风及心肌梗死的发病风险并未增高(整个孕期 $RR/Gy = 0.09$; 95% *CI*: 0.001~8.3, $P = 0.49$), 进一步趋势检验发现中风和心肌梗死发病率与孕龄增加无关($P = 0.47$)^[35]。我国放射工作人员数量众多, 根据 2018 年全国放射卫生监测数据显示^[36], 我国开展放射诊疗的单位有 3.2 万家医院、3.6 万家乡镇卫生院及数量较多的其他机构, 涉及的放射工作人员有 35.3 万人, 个体剂量监测覆盖率稳步上升, 后续可通过建立我国放射工作人员队列研究, 为证实 LDIR 长期接触对心脑血管系统影响提供更有力的证据。

3 展 望

综上所述, 长期 LDIR 接触对人类健康效应影响仍未有一致结论。LDIR 长时接触可能会引发包括癌症以及非癌疾病等健康效应。目前与 LDIR 相关的流行病学研究受到较多的不确定性影响, 其中包括统计或剂量学的不确定性, 以及无法充分控制的混杂因素。未来的研究需要更合理的设计并充分考虑遗传背景、器官特异性风险和其他混杂因素的影响, 以深入探讨 LDIR 诱导的生物学效应或健康效应: 包括 LDIR 长期接触对人群健康影响的队列研究; 反映 LDIR 长期接触相关生物标志物及人群易感性研究; LDIR 与其他职业性有害因素交互作用的研究等。深入开展长期 LDIR 接触人群健康效应研究, 为个体化干预提供新靶点, 为低剂量辐射长期接触人群的针对性防护策略的制定提供强有力的科学依据。此外, 确定 LDIR 与各种疾病之间的因果关系, 并进行 LDIR 长期接触人群健康风险评估, 可为我国放射卫生防护法规与标准体系的建立提供重要参考。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 陈湃韩负责查阅文献、撰写并修改论文; 陈慧峰负责论文选题和修订论文; 邹剑明负责论文选题、审核修订和论文最终版确定

参考文献

- [1] 党旭红, 左雅慧, 王仲文. 低剂量/低剂量率电离辐射对人体健康的影响[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (6): 725-729. DOI: 10.13491/

- j.issn.1004-714X.2019.06.034.
- Dang XH, Zuo YH, Wang ZW. Impacts of low dose or low dose rate ionizing radiation on human health[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019;28 (6) : 725-729 DOI:10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.034.
- [2] Tang FR, Loganovsky K. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human[J]. *J Environ Radioact*, 2018, 192: 32-47. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.018.
- [3] 闵锐. 低剂量/低剂量率电离辐射生物效应[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2014, 32 (6) : 1-9. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rj.32.060101.
- Min R. Biological effects induced by low dose/low dose rate ionizing radiation[J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 2014, 32 (6) : 1-9. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2014.rj.32.060101.
- [4] Daniels RD, Schubauer-Berigan MK. A meta-analysis of leukaemia risk from protracted exposure to low-dose gamma radiation[J]. *Occup Environ Med*, 2011, 68 (6) : 457-464. DOI: 10.1136/oem.2009.054684.
- [5] 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. DOI: 10.1667/RR15358.1.
- [6] Leuraud K, Richardson DB, Cardis E, et al. Ionising radiation and risk of death from leukaemia and lymphoma in radiation-monitored workers (INWORKS): an international cohort study[J]. *Lancet Haematol*, 2015, 2 (7) : e276-e281. DOI: 10.1016/S2352-3026(15)00094-0.
- [7] Spycher BD, Lupatsch JE, Zwahlen M, et al. Background ionizing radiation and the risk of childhood cancer: a census-based nationwide cohort study[J]. *Environ Health Perspect*, 2015, 123 (6) : 622-628. DOI: 10.1289/ehp.1408548.
- [8] Spix C, Grosche B, Bleher M, et al. Background gamma radiation and childhood cancer in Germany: an ecological study[J]. *Radiat Environ Biophys*, 2017, 56 (2) : 127-138. DOI: 10.1007/s00411-017-0689-2.
- [9] Lubin JH, Adams MJ, 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. DOI: 10.1210/jc.2016-3529.
- [10] Zielinski JM, Garner MJ, Band PR, 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. DOI: 10.2478/v10001-009-0010-y.
- [11] Kitahara CM, Preston DL, Neta G, et al. Occupational radiation exposure and thyroid cancer incidence in a cohort of US radiologic technologists, 1983-2013[J]. *Int J Cancer*, 2018, 143 (9) : 2145-2149. DOI: 10.1002/ijc.31270.
- [12] Lee WJ, Preston DL, Cha ES, et al. Thyroid cancer risks among medical radiation workers in South Korea, 1996-2015[J]. *Environ Health*, 2019, 18 (1) : 19. DOI: 10.1186/s12940-019-0460-z.
- [13] Gilbert ES, Sokolnikov ME, Preston DL, et al. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort[J]. *Radiat Res*, 2013, 179 (3) : 332-342. DOI: 10.1667/RR3054.1.
- [14] Velazquez-Kronen R, Gilbert ES, Linet MS, et al. Lung cancer mortality associated with protracted low-dose occupational radiation exposures and smoking behaviors in US radiologic technologists, 1983-2012[J]. *Int J Cancer*, 2020, 147 (11) : 3130-3138. DOI: 10.1002/ijc.33141.
- [15] Pukkala E, Kesminiene A, Poliakov S, et al. Breast cancer in Belarus and Ukraine after the Chernobyl accident[J]. *Int J Cancer*, 2006, 119 (3) : 651-658. DOI: 10.1002/ijc.21885.
- [16] Zupunski L, Yaumenenka A, Ryzhov A, et al. Breast cancer incidence in the regions of Belarus and Ukraine most contaminated by the Chernobyl accident: 1978 to 2016[J]. *Int J Cancer*, 2021, 148 (8) : 1839-1849. DOI: 10.1002/ijc.33346.
- [17] Rivkind N, Stepanenko V, Belukha I, et al. Female breast cancer risk in Bryansk Oblast, Russia, following prolonged low dose rate exposure to radiation from the Chernobyl power station accident[J]. *Int J Epidemiol*, 2020, 49 (2) : 448-456. DOI: 10.1093/ije/dyz214.
- [18] 杨非, 刘竹, 王蒙杰, 等. 低剂量电离辐射对眼晶体损伤的影响分析[J]. *中国辐射卫生*, 2015, 24 (3) : 202-204,212. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.
- Yang F, Liu Z, Wang MJ, et al. The impact analysis of low-dose ionizing radiation on eye lens of occupational population[J]. *Chin J Radiol Health*, 2015, 24 (3) : 202-204,212. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.
- [19] 李洁清, 毛雪松, 马娅, 等. 介入放射工作人员眼晶体健康状况调查[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28 (5) : 485-486,490. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.003.
- Li JQ, Mao XS, Ma Y, et al. Investigation on the lens opacity of interventional radiation workers[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28 (5) : 485-486,490. DOI:10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.003.
- [20] Elmaraezy A, Ebraheem Morra M, Tarek Mohammed A, et al. Risk of cataract among interventional cardiologists and catheterization lab staff: a systematic review and meta-analysis[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2017, 90 (1) : 1-9. DOI: 10.1002/ccd.27114.
- [21] 王焱, 辻真弓, 孙全富, 等. 受低剂量慢性连续照射的居民白内障危险研究[J]. *中国预防医学杂志*, 2012, 13 (10) : 743-746. DOI: 10.16506/j.1009-6639.2012.10.023.
- Wang Y, Mayumi Tsuji, Sun QF, et al. Study on cataracts of inhabitants chronically exposed to low-dose ionizing radiation[J]. *Chin Prev Med*, 2012, 13 (10) : 743-746. DOI: 10.16506/j.1009-6639.2012.10.023.
- [22] 苏垠平, 邹剑明, 谭光享, 等. 阳江高本底地区女性居民甲状腺超声检查的结果与分析[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2016, 36 (11) : 837-841,874. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.11.008.
- Su YP, Zou JM, Tan GX, et al. Analysis on the result of thyroid

- ultrasound examination in female residents in high background radiation area Yangjiang[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2016, 36 (11) : 837-841,874. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.11.008](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.11.008).
- [23] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1006-5180.2020.12.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5180.2020.12.029).
- Chen HX, Li D. Effects of long-term low dose ionizing radiation on thyroid gland of medical personnel[J]. *Chin J Rural Med Pharm*, 2020, 27 (12) : 47-48. DOI: [10.3969/j.issn.1006-5180.2020.12.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5180.2020.12.029).
- [24] 吕扬阳, 王志斌, 张洋, 等. 医用电离辐射对放射工作人员甲状腺功能及结节的影响[J]. *职业与健康*, 2018, 34 (4) : 446-449. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127).
- Lyu YY, Wang ZB, Zhang Y, et al. Influence of medical ionizing radiation on thyroid function and nodules of radiation workers[J]. *Occup Health*, 2018, 34 (4) : 446-449. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2018.0127).
- [25] 妥娅, 赵永成. 低剂量电离辐射对放射工作人员肝功能的影响[J]. *基础医学与临床*, 2017, 37 (12) : 1738-1740. DOI: [10.16352/j.issn.1001-6325.2017.12.014](https://doi.org/10.16352/j.issn.1001-6325.2017.12.014).
- Tuo Y, Zhao YC. Effect of low dose ionizing radiation on liver function of staff exposed to radiation[J]. *Basic Clin Med*, 2017, 37 (12) : 1738-1740. DOI: [10.16352/j.issn.1001-6325.2017.12.014](https://doi.org/10.16352/j.issn.1001-6325.2017.12.014).
- [26] Sun Q, Mao WM, Jiang HY, 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) : E71. DOI: [10.3390/ijerph15010071](https://doi.org/10.3390/ijerph15010071).
- [27] 陈香兰, 奉水东, 刘良丽, 等. 低剂量辐射对铀矿工健康潜在的影响[J]. *实用预防医学*, 2019, 26 (6) : 653-656. DOI: [10.3969/j.issn.1006-3110.2019.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-3110.2019.06.004).
- Chen XL, Feng SD, Liu LL, et al. Potential impact of low-dose radiation on the health of uranium miners[J]. *Pract Prev Med*, 2019, 26 (6) : 653-656. DOI: [10.3969/j.issn.1006-3110.2019.06.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-3110.2019.06.004).
- [28] 吴圻荣, 吴智君, 付远亮, 等. 2010—2019年茂名193名放射人员肝功能水平回顾调查[J]. *临床检验杂志(电子版)*, 2020, 9 (3) : 435-436.
- Wu QR, Wu ZJ, Fu YL, et al. A retrospective survey on liver function of 193 radiologists in Maoming from 2010 to 2019[J]. *Clin Lab J Electron Ed*, 2020, 9 (3) : 435-436.
- [29] 杜维霞. 辐射敏感性影响因素研究[J]. *国外医学(放射医学核医学分册)*, 2003, 27 (5) : 238-240. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1673-4114](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114).
- Du WX. Studies on factors of influence radiation sensitivity[J]. *Foreign Med Sci - Sect Radiat Med Nucl Med*, 2003, 27 (5) : 238-240. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1673-4114](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114).
- [30] Authors on behalf of ICRP, Stewart FA, Akleyev AV, et al. ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context[J]. *Ann ICRP*, 2012, 41 (1/2) : 1-322. DOI: [10.1016/j.icrp.2012.02.001](https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.02.001).
- [31] Azizova TV, Haylock RG, Moseeva MB, et al. Cerebrovascular diseases incidence and mortality in an extended Mayak Worker Cohort 1948-1982[J]. *Radiat Res*, 2014, 182 (5) : 529-544. DOI: [10.1667/rr13680.1](https://doi.org/10.1667/rr13680.1).
- [32] Rajaraman P, Doody MM, Yu CL, et al. Incidence and mortality risks for circulatory diseases in US radiologic technologists who worked with fluoroscopically guided interventional procedures, 1994-2008[J]. *Occup Environ Med*, 2016, 73 (1) : 21-27. DOI: [10.1136/oemed-2015-102888](https://doi.org/10.1136/oemed-2015-102888).
- [33] Laurent O, Metz-Flamant C, Rogel A, et al. Relationship between occupational exposure to ionizing radiation and mortality at the French electricity company, period 1961-2003[J]. *Int Arch Occup Environ Health*, 2010, 83 (8) : 935-944. DOI: [10.1007/s00420-010-0509-3](https://doi.org/10.1007/s00420-010-0509-3).
- [34] 赵玉倩. 阳江高本底地区女性居民心-踝血管指数横断面研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2018.
- Zhao YQ. A cross-sectional study on cardio-ankle vascular index among female residents in high background radiation area in Yangjiang, China[D]. Beijing: Chinese Center For Disease Control and Prevention, 2018.
- [35] Tatsukawa Y, Nakashima E, Yamada M, et al. Cardiovascular disease risk among atomic bomb survivors exposed in utero, 1978-2003[J]. *Radiat Res*, 2008, 170 (3) : 269-274. DOI: [10.1667/RR1434.1](https://doi.org/10.1667/RR1434.1).
- [36] 李小亮, 孙全富. 我国放射工作人员职业健康管理现状与问题[J]. *职业卫生与病伤*, 2019, 34 (6) : 327-330. DOI: [CNKI:SUN:ZYWB.0.2019-06-002](https://doi.org/CNKI:SUN:ZYWB.0.2019-06-002).
- Li XL, Sun QF. Occupational health management status and problems in radiation workers in China[J]. *J Occup Health Damage*, 2019, 34 (6) : 327-330. DOI: [CNKI:SUN:ZYWB.0.2019-06-002](https://doi.org/CNKI:SUN:ZYWB.0.2019-06-002).

(收稿日期: 2021-05-05)