

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2024.02.004

· 论 著 ·

## 利用胞质分裂阻断微核法分析 394 名放射工作人员微核率

刘海翔<sup>1</sup>, 赵骅<sup>2</sup>, 高宇<sup>3</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 张学清<sup>1</sup>, 夏颖<sup>1</sup>

1. 北京核工业医院体检中心, 北京 100045; 2. 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急  
中国疾病预防控制中心重点实验室, 北京 100088; 3. 河南省第三人民医院 河南省职业病医院河南省  
辐射生物与流行病学医学重点实验室, 河南 郑州 450052

**摘要:** **目的** 对放射工作人员微核率进行分析, 为长期接受低水平电离辐射的放射工作人员提供更加准确的职业健康监护依据。**方法** 放射组为在岗期间接触射线的 353 名放射工作人员, 对照组为上岗前尚未接触射线的 41 名放射工作人员。采用胞质分裂阻断微核法测定微核率。**结果** 放射组平均微核率明显高于对照组平均微核率( $t = -2.95, P < 0.05$ )。放射组中, 随着年龄的增加, 微核率逐渐增加, 差异具有统计学意义( $F = 8.36, P < 0.05$ )。10~年和 30~年工龄组人员微核率明显高于<10年工龄组人员的微核率( $\chi^2 = -44.79, -60.47, P < 0.05$ )。女性微核率明显高于男性微核率( $t = 3.93, P < 0.05$ )。放射诊断学组和探伤组的微核率明显高于对照组( $t = 3.51, 3.65, P < 0.05$ )。**结论** 微核率在长期接触低水平电离辐射的放射工作人员中有所增加, 有必要进一步加强对放射工作人员特别是最大的辐射暴露工作者群体医务人员的职业健康监护和辐射防护教育。

**关键词:** CB 微核法; 低水平电离辐射; 放射工作人员; 微核率

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2024)02-0129-06

## Analysis of micronucleus rate in 394 radiation workers with cytokinesis-block micronucleus method

LIU Haixiang<sup>1</sup>, ZHAO Hua<sup>2</sup>, GAO Yu<sup>3</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Xueqing<sup>1</sup>, XIA Ying<sup>1</sup>

1. Medical Examination Center, Beijing Nuclear Industry Hospital, Beijing 100045 China; 2. China CDC Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088 China; 3. Henan Key Laboratory of Medicine on Radiobiology and Epidemiology, Third People's Hospital of Henan Province, Henan Province Occupational Disease Hospital, Zhengzhou 450052 China

**Abstract:** **Objective** To analyze the micronucleus rate of radiation workers and to provide accurate occupational health monitoring basis in radiation workers exposed to low-level ionizing radiation for a long time. **Methods** The radiation group consisted of 353 radiation workers who had been exposed to ionizing radiation during work, while the control group consisted of 41 radiation workers who had not yet been exposed to ionizing radiation before work. The cytokinesis-block micronucleus method was used to determine the micronucleus rate. **Results** The average micronucleus rate in the radiation group was significantly higher than that in the control group ( $t = -2.95, P < 0.05$ ). In the radiation group, the micronucleus rate gradually increased with age, and the difference was statistically significant ( $F = 8.36, P < 0.05$ ). The micronucleus rates of workers with > 10 and > 30 years of service were significantly higher than those of workers with < 10 years of service ( $\chi^2 = -44.79, -60.47, P < 0.05$ ). The micronucleus rate in females was significantly higher than that in males ( $t = 3.93, P < 0.05$ ). The micronucleus rates in the diagnostic radiology group and the industrial detection group were significantly higher than that in the control group ( $t = 3.51, 3.65, P < 0.05$ ). **Conclusion** The micronucleus rate has increased among the radiation workers exposed to low-level ionizing radiation for a long time. It is necessary to further strengthen occupational health monitoring and radiation protection education for radiation workers, especially the medical workers that constitute the largest population of radiation exposure workers.

**Keywords:** Cytokinesis-block micronucleus method; Low-level ionizing radiation; Radiation worker; Micronucleus rate

**Corresponding author:** XIA Ying, Email: [wwwxiaying@sina.com](mailto:wwwxiaying@sina.com)

基金项目: 国家自然科学基金 (82003393)

作者简介: 刘海翔 (1987—), 女, 河北张家口人, 主管检验师, 研究方向为电离辐射损伤及相关分子机制研究。E-mail: [lhx871310@163.com](mailto:lhx871310@163.com)

通信作者: 夏颖, E-mail: [wwwxiaying@sina.com](mailto:wwwxiaying@sina.com)

低水平电离辐射(包括低剂量和低剂量率电离辐射)在我们的环境中无处不在,主要见于天然高本底辐射、高空辐射、核能应用、放射性同位素的生产和应用、医用辐照诊疗等领域。依据联合国原子辐射效应科学委员会、国际辐射防护委员会等组织报道及文献所述,将低剂量电离辐射(Low-dose ionizing radiation, LDIR)定义为:  $\leq 100$  mSv 的辐射剂量,将低剂量率电离辐射(Low-dose-rate ionizing radiation, LDIR)定义为:每小时 6 mSv 或更低的辐射暴露率( $< 6$  mSv/h)<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着核技术的广泛应用,医用诊疗技术的普及,放射工作从业人员日益增多,使得持续接触 LDIR/LDIR 造成的健康隐患研究比以往任何时候都更加紧迫。众所周知,低剂量电离辐射诱导产生的染色体损伤与肿瘤发生存在一定的联系<sup>[4]</sup>。微核作为染色体损伤的生物标志物,与其损伤程度成正比,一直被用作监测放射工作人员在岗期间职业健康较为可靠的评价指标<sup>[5-6]</sup>,对放射工作人员职业健康评估发挥着十分重要的作用。当前国内研究多使用传统的常规培养微核法对放射工作人员职业健康进行评估,该法容易受非分裂细胞的影响,从而降低异常结果的检出率<sup>[7-12]</sup>。因此,本研究采用了胞质分裂阻断微核法(Cytokinesis-block micronucleus method, CB 微核法)对 394 名放射工作人员的微核率进行了分析,以期为长期接受低水平电离辐射的放射工作人员提供更加准确的职业健康评估,为从事放射工作的人员提供职业监护的理论依据。

## 1 对象与方法

**1.1 对象** 以 2022 年来北京核工业医院体检中心参加放射工作人员职业健康检查人员为研究对象。放射组为在岗期间接触射线的 353 名工作人员,放射工龄平均为( $11.9 \pm 9.4$ )年,包括放射诊断学(2A)73 人、核医学(2C)20 人、介入放射学(2E)31 人、工业探伤(3B)50 人、科研(5C)180 人,其中男性放射工作人员为 252 人,女性放射工作人员为 101 人;平均年龄( $39.0 \pm 9.6$ )岁。对照组为上岗前尚未接触射线的 41 名工作人员,其中男性放射工作人员为 23 人,女性放射工作人员为 18 人;平均年龄( $35.7 \pm 11.5$ )岁。放射组与对照组年龄相比,差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。

**1.2 试剂与仪器** 含青链霉素及植物凝集素的人外周血淋巴细胞保存液、浓度为 500  $\mu\text{g/mL}$  松胞素、Giemsa 染液均购自上海乐辰生物科技有限公司,氯

化钾、甲醇、冰醋酸均购自国药集团化学试剂有限公司,细胞恒温培养箱购自常州市申光有限公司,CP-II-64 型自动收获仪、CP-AS-M-05 型自动制片机购自上海乐辰生物科技有限公司,Imager.Z2 自动扫片仪购自德国蔡司。

**1.3 细胞培养** 移液器吸取 0.5 mL 的肝素抗凝外周血样本在超净工作台内接种于淋巴细胞保存液,混匀后放入 37℃ 培养箱中培养,24 h 后加入终浓度为 4  $\mu\text{g/mL}$  的松胞素,混匀后放入 37℃ 培养箱中继续培养。

**1.4 收获、制片及染片** 待样本培养至 72 h 后,将其取出后放入自动收获仪进行收获。收获程序如下:使用 0.075 mol/L 低渗处理 1 次。2 mL 固定液(甲醇:冰醋酸 = 3:1, v/v)预固定 5 min,4 mL 固定液固定 2 次,每次 5 min。将得到的细胞悬液移至自动滴片仪进行滴片,滴片条件:加样量 25  $\mu\text{L}$ ,滴片温度为( $30 \pm 2$ )℃,滴片湿度为 68%。以 5% 的 Giemsa 染液进行染色,冲洗晾干。

**1.5 扫片分析** 使用 Imager.Z2 自动扫片仪(100 × 倍镜)将含有双核的淋巴细胞扫描至 Metafer4 图像分析软件(MetaSystems 有限公司)。人工选取细胞胞浆边界完整,两个细胞核形态及染色深浅度相近且尽量完全分离的双核细胞进行分析,如果两个细胞核发生部分重叠时,应确保可以清晰看到各自的核膜。微核判定标准:游离于胞质中小的圆形或椭圆形核,与主核不重叠,不相连,其大小应大于主核的 1/16,并小于主核的 1/3,边界清晰,颜色深浅与主核相同或略浅。每个样本分析 1000 个双核细胞,对于含有 2 个及以上的微核细胞采用双人阅片复核进行确认,计算微核率(‰)。

**1.6 统计分析** 采用 SPSS 28.0 统计学软件,数据描述采用均值  $\pm$  标准差。计量资料经检验符合正态分布者,多组间均数比较采用  $t$  检验或单因素方差分析;不符合正态分布者,如不同工龄组间的微核率,多组间差异比较采用 Kruskal-Wallis H 检验。Bonferroni 校正用于多组间的事后两两比较。以统计值  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 放射组与对照组外周血淋巴细胞微核率分析** 从表 1 可以看出,放射组平均微核率( $13.15 \pm 5.27$ )‰高于对照组平均微核率( $10.61 \pm 4.71$ )‰,差异具有统计学意义( $t = -2.95, P < 0.05$ )。

表 1 放射工作人员不同组间细胞微核率结果

Table 1 Micronucleus rate among different groups of radiation workers

组别	人数	分析 细胞数/个	细胞微核率 ( $\bar{x} \pm SD, \%$ )
对照组	41	41000	10.61 $\pm$ 4.71
放射组	353	353000	13.15 $\pm$ 5.27
<i>t</i> 值			-2.95
<i>P</i> 值			0.003

2.2 不同年龄段放射组与对照组外周血淋巴细胞微核率分析 按照年龄段将放射组及对对照组划分为 4 组,从表 2 可以看出,不同年龄段组中的放射组微核率总体高于同一年龄段对照组的微核率,其中 50~ 岁年龄段放射组平均微核率(14.90  $\pm$  5.33)% 显著高于同一年龄段对照组平均微核率(10.14  $\pm$  3.49)%,差异具有统计学意义( $t = -2.30, P < 0.05$ )。放射组中,随着年龄的增加,微核率逐渐增加,而且差异具有统计学意义( $F = 8.36, P < 0.05$ )。

表 2 不同年龄段放射组与对照组外周血淋巴细胞微核率结果

Table 2 Micronucleus rate in the radiation group and the control group at different ages

年龄 (岁)	对照组		放射组	
	人数	微核率( $\bar{x} \pm SD, \%$ )	人数	微核率( $\bar{x} \pm SD, \%$ )
20~	19	9.11 $\pm$ 4.71	57	10.86 $\pm$ 4.24
30~	9	12.78 $\pm$ 5.17	123	12.46 $\pm$ 4.45
40~	6	12.67 $\pm$ 4.23	105	14.08 $\pm$ 6.05
50~	7	10.14 $\pm$ 3.49	68	14.90 $\pm$ 5.33 <sup>a</sup>
<i>F</i> 值	1.78		8.36	
<i>P</i> 值	0.167		<0.001	

注:*a*表示与同一年龄段对照组比较,  $P < 0.05$

2.3 不同工龄放射工作人员外周血淋巴细胞微核率分析 按照工龄将全部人员划分为 4 组,从表 3 可以看出,不同工龄组间微核率的差异具有统计学意义( $H = 16.96, P < 0.05$ )。10~ 年、20~ 年、30~ 年工龄组人员的微核率总体上高于 < 10 年工龄组人员,且 10~ 年和 30~ 年工龄组人员微核率高于 < 10 年工龄组人员的微核率,差异均具有统计学意义( $\chi^2 = -44.79, -60.47, P < 0.05$ )。

2.4 不同年龄段男性与女性外周血淋巴细胞微核率分析 从表 4 可以看出,女性微核率(14.45  $\pm$  5.62)% 高于男性微核率(12.21  $\pm$  4.97)%,差异具有统计学意

表 3 不同工龄放射工作人员微核率分析

Table 3 Micronucleus rate of radiation workers of different service years

工龄(年)	人数	分析细胞数	微核数	微核率( $\bar{x} \pm SD, \%$ )
<10	220	220000	2631	11.96 $\pm$ 4.98
10~	109	109000	1533	14.06 $\pm$ 5.50 <sup>a</sup>
20~	40	40000	531	13.28 $\pm$ 5.15
30~	25	25000	382	15.28 $\pm$ 5.41 <sup>a</sup>
<i>H</i> 值				16.96
<i>P</i> 值				0.001

注:*a*表示与工龄 < 10 年组比较,  $P < 0.05$ 。

义( $F = 3.93, P < 0.05$ )。而且,不同年龄段组中的女性微核率均高于同一年龄段男性微核率,除 20~ 岁年龄段差异没有统计学意义,其他年龄段中差异均具有统计学意义( $t = 2.43、2.50、2.10, P < 0.05$ )。

表 4 不同年龄段男性与女性外周血淋巴细胞微核率

Table 4 Micronucleus rate in males and females of different ages

年龄 (岁)	男性		女性	
	人数	微核率( $\bar{x} \pm SD, \%$ )	人数	微核率( $\bar{x} \pm SD, \%$ )
20~	57	10.16 $\pm$ 4.05	19	11.21 $\pm$ 5.34
30~	84	11.77 $\pm$ 4.20	48	13.71 $\pm$ 4.74 <sup>a</sup>
40~	78	13.10 $\pm$ 5.74	33	16.12 $\pm$ 6.01 <sup>a</sup>
50~	56	13.71 $\pm$ 5.06	19	16.63 $\pm$ 5.74 <sup>a</sup>
合计	275	12.21 $\pm$ 4.97	119	14.45 $\pm$ 5.62 <sup>b</sup>

注:*a*表示与同一年龄段男性比较,  $P < 0.05$ ; *b*表示与男性比较,  $P < 0.05$ 。

2.5 不同工种放射工作人员外周血淋巴细胞微核率分析 按照工种将放射工作人员划分为 6 组,从表 5 可以看出,各放射工种微核率均高于对照组,不同工种间的微核率差异具有统计学意义( $F = 3.31, P < 0.05$ )。经 Bonferroni 校正后两两比较,发现放射诊断学组和工业探伤组的微核率明显高于对照组( $t = 3.51、3.65, P < 0.05$ )。

3 讨 论

近年来,随着核技术应用的迅猛发展,放射工作人员群体大大增加。长期接触低剂量电离辐射而产生的健康风险是首要考虑因素。中国疾病预防控制中心辐射安全所监测数据显示,由于辐射防护水平的提高,从 2010 年到 2016 年,医疗放射工作者的年平均有效剂量呈稳步下降趋势。2016 年,所有医疗放射



表 5 不同工种放射工作人员微核率分析

Table 5 Micronucleus rates of radiation workers in different types of work

职业类别	人数	分析细胞数	微核数	微核率( $\bar{x} \pm SD, \%$ )
对照组	41	41 000	435	10.61 $\pm$ 4.71
放射诊断学组	73	73 000	1031	14.12 $\pm$ 5.51 <sup>a</sup>
核医学组	20	20 000	261	13.05 $\pm$ 3.56
介入放射学组	31	31 000	378	12.19 $\pm$ 3.49
工业探伤组	50	50 000	713	14.26 $\pm$ 5.35 <sup>a</sup>
科研组	179	179 000	2259	12.62 $\pm$ 5.50
F值	3.31			
P值	0.006			

注:a表示与对照组比较,  $P < 0.05$ 。

工作者的平均年有效剂量为 0.35 mSv, 远低于中国 1996—2000 年的 1.2 mSv, 更远远低于辐射防护的剂量限值(5 年平均有效剂量  $\leq 20$  mSv)<sup>[13]</sup>。但是, 从事核技术应用的放射工作人员仍然是外照射水平较高的职业人群。辐射防护的剂量限值是基于流行病学研究得出的辐射致癌风险理论, 除了癌症风险外, 越来越多的证据表明非癌症疾病的风险与其密切相关, 包括循环系统疾病、白内障等<sup>[14-15]</sup>。迫切需要进一步研究低水平电离辐射对机体的影响。低剂量效应可以部分归因于 DNA 损伤, 正如一些研究表明的那样, 低剂量辐射后的 DNA 损伤可能会逃避细胞监视和修复, 并在后期发展为诱变灾难性事件<sup>[16]</sup>。低剂量辐射诱导 DNA 损伤产生的健康问题值得进一步研究<sup>[17]</sup>。CB 微核法已成为评估放射工作人员职业暴露产生的 DNA 损伤最有效和应用最广泛的方法。与传统的微核技术相比, CB 微核法可以消除由核分裂抑制剂或衰老(降低淋巴细胞对有丝分裂原反应性)等因素引起的假阴性结果, 使得结果更加稳健<sup>[18]</sup>。与辐射高度特异性的双着丝粒染色体分析相比, 虽然 CB 微核法的辐射特异性较低, 但更容易操作分析, 易于实现自动化。现有研究表明, 通过 CB 微核法测定的淋巴细胞中的微核率是癌症、心血管疾病死亡率、妊娠并发症、糖尿病、自身免疫性疾病和神经退行性疾病潜在风险增加的有效标志<sup>[18]</sup>。

本研究采用 CB 微核法对 394 名放射工作人员的微核率进行了分析, 结果显示放射组平均微核率显著高于对照组平均微核率, 且两组平均微核率相差达 2.5%, 这与 Angelini 等<sup>[19]</sup>研究采用 CB 微核法得出的结果相近。现有研究显示, 在 CB 微核法中, 放

射组比对照组的平均微核率高出范围维持在 2.0%~10.0% 间<sup>[19-22]</sup>。而在采用传统微核培养法中, 放射组比对照组的平均微核率高出范围维持在 0.1%~1% 间<sup>[8-9, 11]</sup>。与传统微核培养法相比, CB 微核法中放射组和对照组之间平均微核率的差距更加明显, 从而使得该法可能更易于发现放射工作人员接触低剂量辐射所导致的遗传不稳定性。

将放射组及对照组微核率按照年龄段进行比较, 结果显示, 放射组中, 随着年龄的增加, 微核率逐渐增加, 而且差异具有统计学意义; 对照组中, 30~岁到 50~岁年龄段的微核率均高于 20~岁年龄段, 但差异无统计学意义。这与部分已有研究报道的结果相符合<sup>[8-9, 11, 19, 23]</sup>。还有部分研究显示微核的形成与年龄的增加存在显著相关性<sup>[24-25]</sup>。大多数研究数据支持老年群体的微核率要高于年轻群体, 可能由于不同研究分析对象不同, 同时受到一些可以影响微核形成的内在、外在因素的影响, 从而造成对照组中不同年龄段中的微核率差异程度略有不同, 未来还需扩大研究对象进一步分析, 以排除其他因素造成的干扰。也有研究指出, 年龄与放射组的微核率增加更为相关, 这可能是由于随着年龄的增长, 对电离辐射诱导产生的遗传不稳定性修复减慢, 从而造成 DNA 损伤在机体内累积导致的<sup>[26]</sup>。进一步将放射组按照不同工龄组进行分析发现, 10~年、20~年和 30~年工龄人员的微核率总体均高于低工龄组( $< 10$  年)人员, 该结果与王静等<sup>[11]</sup>的报道一致。工龄与辐射暴露时间密切相关, 这些结果提示放射工作人员微核率随着工龄逐渐升高可能与电离辐射累积效应有关<sup>[26]</sup>。

本研究显示女性微核率总体高于男性微核率, 而且不同年龄段组中的女性微核率均高于同一年龄段男性微核率, 与当前众多研究结果一致<sup>[12, 19, 23, 27]</sup>。研究显示, 机体对辐射诱导的生物效应具有性别特异性, 女性职业辐射暴露发生后囊下、皮质性和核性白内障及肿瘤的风险均要高于男性<sup>[28-29]</sup>。有研究揭示, X 性染色体遗失可能是造成微核率在男女性别间不同的原因<sup>[30]</sup>。但是, 对于低水平电离辐射暴露, 女性是否较男性更为敏感, 还需要更为深入的调查研究来进一步证实。本研究及当前研究结果揭示, 在从事放射相关工作时, 应该更加重视对女性放射从业人员的职业健康检查和辐射防护。

最后, 本研究将放射工作人员按照工种分类进行分析, 各放射工种微核率均高于对照组, 不同工种间的微核率差异具有统计学意义, 其中以放射诊断学组

和探伤组的微核率最高。叶淑敏<sup>[8]</sup>利用常规培养微核法对 735 名放射工作人员进行了分析,该研究发现,医疗诊断组的微核率同样是最高的。但是,工业探伤组在该项研究中是最低的。还有一些研究结果显示,介入放射组中的微核率最高<sup>[9,12]</sup>。这可能是由于不同分析对象所在的工作环境中的放射防护条件不同造成的,遗憾的是,包括本研究在内的众多研究由于缺乏人均年有效剂量,无法分析微核率与人均年有效剂量之间的关系,无法证明不同研究得出的结论不尽相同是否与分析对象不同人均年有效剂量相关,后续需要补充相关数据,进一步探讨。

综上所述,无论是常规培养法还是 CB 微核法,长期接触低水平电离辐射放射工作人员的微核率确实会有不同程度的增加。考虑到微核率是癌症、心血管等疾病潜在风险增加的有效标志及不利影响。提示低水平电离辐射诱发的遗传不稳定性不容忽视,有必要进一步加强对放射工作人员特别是最大的辐射暴露工作者群体医务人员的职业健康监护和辐射防护教育。此外,本研究发现 CB 微核法中放射组和对照组之间平均微核率的差距更加明显,从而使得该法可能更易于发现放射工作人员接触低水平电离辐射所导致的遗传不稳定性,建议尽量使用 CB 微核法分析放射工作人员的 DNA 损伤程度。

**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** 刘海翔负责文献调研、结果分析及文章撰写;赵骅、高宇负责参与数据处理;张学清、张杰负责参与实验操作及数据搜集;夏颖负责论文修订与审核

## 参考文献

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the general assembly, with scientific annexes[R]. New York: United Nations, 2000. DOI: 10.18356/49c437f9-en.
- [2] The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP publication 103[J]. *Ann ICRP*, 2007, 37 ( 2/4 ) : 1-332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003..
- [3] Charles M. UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation[J]. *J Radiol Prot*, 2001, 21 ( 1 ) : 83-86. DOI: 10.1088/0952-4746/21/1/609.
- [4] 吕玉民. 染色体畸变在急、慢性辐射损伤评估中的意义专家解析[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28 ( 4 ) : 349-354,360. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.04.001.

Lv YM. Expert interpretation on the significance of chromosomal aberration in the assessment of acute and chronic radiation damage[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28 ( 4 ) : 349-354,360. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.04.001.

- [5] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ/T 328—2023 放射工作人员职业健康检查外周血淋巴细胞微核检测方法与受照剂量估算标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2023. National Health Commission of the People's Republic of China. GBZ/T 328 —2023 Standard for the method of micronucleus detection in lymphocytes on occupational health examination for radiation workers and exposure dose estimation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [6] 中华人民共和国卫生部. GBZ 235—2011 放射工作人员职业健康监护技术规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2011. Minister of Health of the People's Republic of China. GBZ 235—2011 Specifications for occupational health surveillance for radiation workers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [7] Fenech M. Cytokinesis-Block micronucleus cyto assay evolution into a more comprehensive method to measure chromosomal instability[J]. *Genes*, 2020, 11 ( 10 ) : 1203. DOI: 10.3390/genes11101203.
- [8] 叶淑敏. 放射工作人员735人淋巴细胞微核检测结果分析[J]. *海峡预防医学杂志*, 2023, 29 ( 1 ) : 84-86. Ye SM. Analysis of lymphocyte micronucleus in 735 radiation workers[J]. *Strait J Prev Med*, 2023, 29 ( 1 ) : 84-86.
- [9] 王志敏. 淄博市放射工作人员外周血淋巴细胞微核率分析[J]. *中国工业医学杂志*, 2022, 35 ( 5 ) : 463-465. DOI: 10.13631/j.cnki.zggyyx.2022.05.026. Wang ZM. Analysis of micronucleus rate of peripheral blood lymphocytes of radiological workers in Zibo city[J]. *Chin J Ind Med*, 2022, 35 ( 5 ) : 463-465. DOI: 10.13631/j.cnki.zggyyx.2022.05.026.
- [10] 黄磊,赵士义,王楠,等. 天津市2021年放射工作人员职业健康检查结果分析[J]. *辐射防护通讯*, 2022, 42 ( 4/5 ) : 2-6. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2022.04.002. Huang L, Zhao SY, Wang N, et al. Analysis of occupational health examination results of radiation workers in Tianjin in 2021[J]. *Radiat Prot Bull*, 2022, 42 ( 4/5 ) : 2-6. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2022.04.002.
- [11] 王静,周学文,梅丹,等. 湖北省放射工作人员外周血淋巴细胞微核检测结果分析[J]. *工业卫生与职业病*, 2023, 49 ( 5 ) : 442-444. DOI: 10.13692/j.cnki.gywsyzyb.2023.05.015. Wang J, Zhou XW, Mei D, et al. Analysis of micronucleus test results of peripheral blood lymphocytes among radiation workers in Hubei Province[J]. *Ind Health Occup Dis*, 2023, 49 ( 5 ) : 442-444. DOI: 10.13692/j.cnki.gywsyzyb.2023.05.015.
- [12] 李杰,韩林,王平,等. 921名放射工作人员个人年有效剂量与外周血淋巴细胞微核率关系分析[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28 ( 5 ) : 487-490. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.004. Li J, Han L, Wang P, et al. Analysis of individual annual efficient

- dose and micronucleus results in peripheral blood lymphocytes of 921 radiation workers[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28 ( 5 ) : 487-490. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.004](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2019.05.004).
- [13] Deng J, Fan SN, Wang T, et al. Trends and distribution analysis of occupational exposure from medical practices in China (2010-2016)[J]. *Health Phys*, 2019, 117 ( 6 ) : 656-660. DOI: [10.1097/HP.0000000000001118](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001118).
- [14] Tapio S, Little MP, Kaiser JC, et al. Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases[J]. *Environ Int*, 2021, 146: 106235. DOI: [10.1016/j.envint.2020.106235](https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106235).
- [15] 刘剑英, 尚伟华, 马得勋, 等. 长期低剂量核辐射接触人员机体相关指标变化[J]. *中国辐射卫生*, 2023, 32 ( 2 ) : 167-170. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.015](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.015).
- Liu JY, Shang WH, Ma DX, et al. Changes in body-related indices in people exposed to long-term low-dose nuclear radiation[J]. *Chin J Radiol Health*, 2023, 32 ( 2 ) : 167-170. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.015](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.015).
- [16] Mavragani IV, Nikitaki Z, Kalospyros SA, et al. Ionizing radiation and complex DNA damage: from prediction to detection challenges and biological significance[J]. *Cancers*, 2019, 11 ( 11 ) : 1789. DOI: [10.3390/cancers11111789](https://doi.org/10.3390/cancers11111789).
- [17] Cwikel JG, Gidron Y, Quastel M. Low-dose environmental radiation, DNA damage, and cancer: the possible contribution of psychological factors[J]. *Psychol Health Med*, 2010, 15 ( 1 ) : 1-16. DOI: [10.1080/13548500903431493](https://doi.org/10.1080/13548500903431493).
- [18] Nersesyan A, Fenech M, Bolognesi C, et al. Use of the lymphocyte cytokinesis-block micronucleus assay in occupational biomonitoring of genome damage caused by in vivo exposure to chemical genotoxins: past, present and future[J]. *Mutat Res Rev Mutat Res*, 2016, 770: 1-11. DOI: [10.1016/j.mrrev.2016.05.003](https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.05.003).
- [19] Angelini S, Kumar R, Carbone F, et al. Micronuclei in humans induced by exposure to low level of ionizing radiation: influence of polymorphisms in DNA repair genes[J]. *Mutat Res Fundam Mol Mech Mutagen*, 2005, 570 ( 1 ) : 105-117. DOI: [10.1016/j.mrfmmm.2004.10.007](https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2004.10.007).
- [20] Bouraoui S, Mougou S, Drira A, et al. A cytogenetic approach to the effects of low levels of ionizing radiation (IR) on the exposed Tunisian hospital workers[J]. *Int J Occup Med Environ Health*, 2013, 26 ( 1 ) : 144-154. DOI: [10.2478/s13382-013-0084-4](https://doi.org/10.2478/s13382-013-0084-4).
- [21] Sari-Minodier I, Orsière T, Auquier P, et al. Cytogenetic monitoring by use of the micronucleus assay among hospital workers exposed to low doses of ionizing radiation[J]. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*, 2007, 629 ( 2 ) : 111-121. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2007.01.009](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.01.009).
- [22] Fang LY, Li JQ, Li WG, et al. Assessment of genomic instability in medical workers exposed to chronic Low-Dose X-Rays in northern China[J]. *Dose Response*, 2019, 17(4): 1559325819891378. DOI: [10.1177/1559325819891378](https://doi.org/10.1177/1559325819891378).
- [23] 李丽梅, 高朝贤, 惠长野, 等. 深圳市2015—2020年放射工作人员上岗前职业健康检查染色体畸变率与微核率分析[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2022, 46 ( 8 ) : 471-477. DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202201015-00211](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202201015-00211).
- Li LM, Gao CX, Hui CY, et al. Analysis of chromosome aberration rate and micronucleus rate of pre-job occupational health examination of radiation workers in Shenzhen from 2015 to 2020[J]. *Int J Radiat Med Nucl Med*, 2022, 46 ( 8 ) : 471-477. DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202201015-00211](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202201015-00211).
- [24] Hopf NB, Danuser B, Bolognesi C, et al. Age related micronuclei frequency ranges in buccal and nasal cells in a healthy population[J]. *Environ Res*, 2020, 180: 108824. DOI: [10.1016/j.envres.2019.108824](https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108824).
- [25] Cai TJ, Lu X, Tian XL, et al. Effects of age and gender on the baseline and 2 Gy  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray-induced nucleoplasmic bridges frequencies in the peripheral blood lymphocytes of Chinese population[J]. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen*, 2018, 832-833: 29-34. DOI: [10.1016/j.mrgentox.2018.06.013](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.06.013).
- [26] Laffon B, Bonassi S, Costa S, et al. Genomic instability as a main driving factor of unsuccessful ageing: potential for translating the use of micronuclei into clinical practice[J]. *Mutat Res Rev Mutat Res*, 2021, 787: 108359. DOI: [10.1016/j.mrrev.2020.108359](https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2020.108359).
- [27] 杨永清, 董伯森, 赵芳, 等. 邯郸市541名放射工作人员淋巴细胞微核分析[J]. *职业与健康*, 2011, 27 ( 16 ) : 1816-1818. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.16.024](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.16.024).
- Yang YQ, Dong BS, Zhao F, et al. Analysis on micronucleus of lymphocytes of 541 radiation workers in Handan city[J]. *Occup Health*, 2011, 27 ( 16 ) : 1816-1818. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.16.024](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2011.16.024).
- [28] Azizova TV, Hamada N, Grigoryeva ES, 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. DOI: [10.1007/s10654-018-0450-4](https://doi.org/10.1007/s10654-018-0450-4).
- [29] Tang FR, Loke WK, Khoo BC. Low-dose or low-dose-rate ionizing radiation-induced bioeffects in animal models[J]. *J Radiat Res*, 2017, 58 ( 2 ) : 165-182. DOI: [10.1093/jrr/rrw120](https://doi.org/10.1093/jrr/rrw120).
- [30] 白玉书, 陈德清. 人类辐射细胞遗传学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2006.
- Bai YS, Chen DQ. Human radiation cytogenetics[M] Beijing: People's Medical Publishing House, 2006.

(收稿日期: 2023-09-06)