

## $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ 与 CR39 监测中子个人剂量浅析

徐健<sup>1</sup>, 武云云<sup>1</sup>, 郭文<sup>1</sup>, 翟贺争<sup>2</sup>, 王曼瑶<sup>2</sup>, 张琪<sup>2</sup>, 丁艳秋<sup>1</sup>

1. 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; 2. 中国医学科学院放射医学研究所, 天津 300192

**摘要:** 目的 初步探讨 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  与 CR39 监测中子个人剂量方法的差别, 为完善中子个人剂量监测提供参考。方法 依据 GBZ 128—2019 对中子个人剂量进行监测, 采用 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  和 CR39 同时监测中子个人剂量, 对 7 家单位的 26 名放射工作人员进行中子个人剂量监测, 同时对监测结果进行分析。结果 大部分工作人员的中子个人剂量当量  $H_p(10) < \text{MDL}$ , 26 名人员中有 6 名人员 2 种监测方法的结果存在一定差异。结论  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  和 CR39 监测方法均可用于放射工作人员中子个人剂量监测, 但应考虑 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  与 CR39 的阈能、能量响应等的区别, 针对不同类别的放射工作场所人员选用合适的中子个人剂量监测方法。

**关键词:**  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ ; CR39; 中子剂量; 个人剂量监测

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)06-0626-06

## A preliminary analysis of individual neutron dose monitoring with $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ and CR39

XU Jian<sup>1</sup>, WU Yunyun<sup>1</sup>, GUO Wen<sup>1</sup>, ZHAI Hezheng<sup>2</sup>, WANG Manyao<sup>2</sup>, ZHANG Qi<sup>2</sup>, DING Yanqiu<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, China CDC, National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088 China; 2. Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Tianjin 300192 China

**Abstract:** **Objective** To preliminarily compare  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  and CR39 in individual neutron dose monitoring, and to provide a reference for improving individual neutron dose monitoring. **Methods** According to the GBZ 128-2019, 26 radiation workers from 7 institutions received individual neutron dose monitoring with  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  and CR39 at the same time. The monitoring results were analyzed. **Results** For most of the workers, the personal neutron dose equivalent  $H_p(10)$  was less than the minimum detectable level. The results with the two monitoring methods differed in 6 of 26 workers. **Conclusion** Both  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  and CR39 monitoring methods can be used for individual neutron dose monitoring for radiation workers, but the difference between  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  and CR39 (in threshold energy, energy response, etc.) should be considered so that different types of radiation workers receive appropriate individual neutron dose monitoring.

**Keywords:**  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ ; CR39; Neutron dose; Individual dose monitoring

**Corresponding author:** DING Yanqiu, Email: [dingyanqiu@nirp.chinacdc.cn](mailto:dingyanqiu@nirp.chinacdc.cn)

随着核技术广泛应用与发展, 涉及中子场所越来越多, 如工业、医学和科研等领域<sup>[1-6]</sup>。中子属于高传能线密度(linear energy transfer, LET)射线, 能够将大部分能量沉积在细胞组织内, 从而导致严重的损伤<sup>[7]</sup>, 影响相关人员的生命健康。因此, 在中子高风险的领域进行中子个人剂量监测具有非常重要的意义。目前, 中子个人剂量监测常用的被动式监测方法主要为 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  热释光反照率监测方法和 CR39 固体核径迹监测方法<sup>[8-10]</sup>。

入射到人体表面较高能量的中子与人体相互作用后被慢化和散射, 最终以中低能中子离开身体表面成为反照中子<sup>[11]</sup>, 利用佩戴在人体表面用来探测反照中子的剂量计估算中子个人剂量当量  $H_p(10)$  的方法称为反照率监测方法。热释光反照率监测方法利用在含 B 塑料或 Cd 片的反照剂量计内放置一对或几对 $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  探测器来监测中子个人剂量当量  $H_p(10)$ , 含 B 塑料或 Cd 片上方的 $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  用来探测场所热中子, 含 B 塑料或 Cd 片下方的 $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  用来探测反

照中子和计算中子个人剂量当量  $H_p(10)^{[12]}$ 。该方法的优点有阈能低、探测下限低、易读等,缺点主要是能量响应较依赖于中子能量<sup>[13]</sup>。CR39 固体核径迹监测方法是根据中子产生的带电粒子(裂变碎片、反冲质子、粒子或 C、H、O 反冲核等的作用)在 CR39 上形成损伤潜迹,经过一定的化学蚀刻或电化学蚀刻后扩大损伤,进而形成在光学显微镜下观测到的径迹<sup>[14]</sup>,经刻度后可得到中子个人剂量当量  $H_p(10)$ 。该方法的优点有抗干扰能力强、可重复测读等,缺点主要是不能重复使用、读出困难、阈能高、探测下限高<sup>[13]</sup>。目前这 2 种被动式监测方法被监测单位广泛使用,但国内很少有单位同时采用这 2 种监测方法进行监测,也很少见到 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  热释光反照率方法与 CR39 固体核径迹方法监测中子进行比较研究的报道。因此,本文随机选取了 7 家单位的 26 名放射工作人员采用 2 种方法同时进行中子个人剂量监测,初步探讨中子个人剂量监测中存在的一些问题,为完善中子个人剂量监测方法提供部分参考。

## 1 材料与方法

1.1 监测方法及基本情况 依据 GBZ 128—2019《职业性外照射个人监测规范》<sup>[15]</sup>对于中子个人剂量监测的相关要求开展中子个人剂量监测。CR39 中子个人剂量监测依据 GBZ/T 148—2002《用于中子测井的 CR39 中子剂量计的个人剂量监测方法》<sup>[16]</sup>进行监测。反照中子个人剂量监测依据 JJG(军工)35—2014《个人监测用热释光反照率中子剂量测量系统检定规程》<sup>[17]</sup>进行监测。由于目前国内尚无商售的热释光反照率剂量计,进口的热释光反照率剂量计较为昂贵,大多数监测单位采用无反照率配置(无含 B 塑料或 Cd 片)的普通剂量计进行监测。为了更有效地与实际监测情况保持一致,采用普通剂量计进行监测,监测人员佩戴同时装有 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ 和 CR39 的普通剂量计(内装 1 片 CR39 和 2 对 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ ),同时准备跟随本底剂量计。

随机选取了 7 家单位的 26 名放射工作人员同时采用 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ 和 CR39 2 种方法进行监测,被监测人员的基本情况如表 1 所示。

### 1.2 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$ 中子个人剂量监测

1.2.1 仪器与设备 北京防化研究院生产的 RGD-3 型热释光剂量读出仪,北京核仪器厂生产的 FJ-411 型退火炉,北京光润意通辐射监测设备有限公司生产的  $\text{LiF}(\text{Mg,Cu,P})(\Phi 4.5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm})$  的圆片,

表 1 被监测人员基本情况

被监测单位	被监测人数	监测周期
某同位素医药公司	3	20221015—20230114
某油田测试公司	4	20221017—20230116
某微电子有限公司	2	20221022—20230121
某生态环境监测中心	8	20221101—20230131
某智能设备公司	5	20221126—20230225
某环保科技有限公司	2	20221201—20230228
某炼石水泥公司	2	20221210—20230309

分散性  $\leq 5\%$ 。

1.2.2  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  的刻度 准备 7 组 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  热释光剂量计,每组包括 3 枚剂量计,其中 1 组作为本底组,1 组用中国计量科学研究院标准 $^{137}\text{Cs}$ 源进行  $\gamma$  响应比较,5 组剂量计放置在平板水模体上(ISO 推荐标准 PMMA 平板水模体,尺寸  $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ ),在中国计量科学研究院标准 $^{241}\text{Am-Be}$  中子源上垂直照射,照射剂量分别为:0.5 mSv、1.0 mSv、2.0 mSv、3.0 mSv 和 5.0 mSv。

1.2.3  $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  剂量计最低可探测水平(minimum detectable level, MDL) 根据《外照射个人剂量系统性能检验规范》(GBZ 207—2016)<sup>[18]</sup>,按照公式 1)可计算 $^6\text{LiF}$ - $^7\text{LiF}$  的 MDL:

$$\text{MDL} = 3 \times u_A(x_i) \quad (1)$$

式中: $u_A(x_i)$ 为 MDL 组剂量计测量结果的检验标准差。

1.2.4 中子个人剂量当量  $H_p(10)$  的估算 根据 $^6\text{LiF}$  同时对光子和中子灵敏,而 $^7\text{LiF}$  仅对光子灵敏,通过 $^6\text{LiF}$  和 $^7\text{LiF}$  的差值可估算中子个人剂量当量  $H_p(10)^{[19]}$ ,如公式 2)所示:

$$E = [(R_6 - B_6) - (R_7 - B_7) \times P] \times K_n \quad (2)$$

式中: $E$  为监测人员中子个人剂量当量  $H_p(10)$ , mSv;  $R_6$ ,  $R_7$  为 $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  的测量值;  $B_6$ ,  $B_7$  为 $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  的本底测量值;  $K_n$  为中子校准系数, mSv;  $P$  为 $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  对  $\gamma$  射线响应的比值。

### 1.3 CR39 中子个人剂量监测

1.3.1 仪器与设备 英国 Track Analysis Systems 公司生产的 TASLIMAGE 核径迹测量系统,日本 Fukuvi 公司生产的聚烯丙基二甘醇碳酸酯(polyallyldiglycol carbonate, PADC),简称 CR39,将其切割成  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  规格的探测元件。

1.3.2 CR39 的刻度 准备 6 组 CR39 剂量计, 每组包括 3 枚剂量计, 其中 1 组作为本底组, 5 组剂量计放置在平板水模体上, 在中国计量科学研究院标准  $^{241}\text{Am-Be}$  中子源上垂直照射, 照射剂量和  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  的刻度相同。

1.3.3 CR39 剂量计的 MDL CR39 的 MDL 的计算如公式 3) 所示<sup>[20]</sup>:

$$\text{MDL} = 2 \times K \times \sqrt{N_b} \quad (3)$$

式中:  $K$  为中子校准系数,  $\text{mSv}/(\text{tr} \cdot \text{cm}^{-2})$ ;  $N_b$  为未暴露片的径迹密度,  $\text{tr} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

1.3.4 CR39 的径迹蚀刻及中子个人剂量当量  $H_p(10)$  估算 在中子个人剂量监测中, CR39 常用的径迹蚀刻条件是: 蚀刻溶液为 6.25 mol/L 的 NaOH 溶液、蚀刻温度为 70℃、蚀刻时间为 10.0 h<sup>[21]</sup>, 中子个人剂量当量  $H_p(10)$  的计算如公式 4) 所示:

$$E = (N_c - N_b) \times K \quad (4)$$

式中:  $E$  为监测人员中子个人剂量当量  $H_p(10)$ ,  $\text{mSv}$ ;  $K$  为中子校准系数,  $\text{mSv}/(\text{tr} \cdot \text{cm}^{-2})$ ;  $N_c$  和  $N_b$  分别为暴露片和未暴露片的径迹密度,  $\text{tr} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  $N_c - N_b$  为中子剂量片的净径迹密度,  $\text{tr} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

1.4 质量控制 热释光测量系统、TASLIMAGE 核径迹测量系统每年在计量部门进行检定或校准; 个人剂量监测操作人员经过相关专业培训, 按照操作规程完成监测工作; 对原始记录、测读结果进行认真校核。

## 2 结果

2.1  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  的刻度结果  $^6\text{LiF}$  的  $\gamma$  射线相对响应因子  $P$  为  $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  对  $\gamma$  射线响应的比值, 根据测读结果可得到  $P$  为 0.81。采用最小二乘法拟合  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  的计数值与中子参考剂量, 可得到中子剂量刻度曲线, 如图 1 所示。 $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  中子刻度曲线的相关系数  $R^2$  为 0.9997, 校准系数为 0.0405  $\text{mSv}$ 。

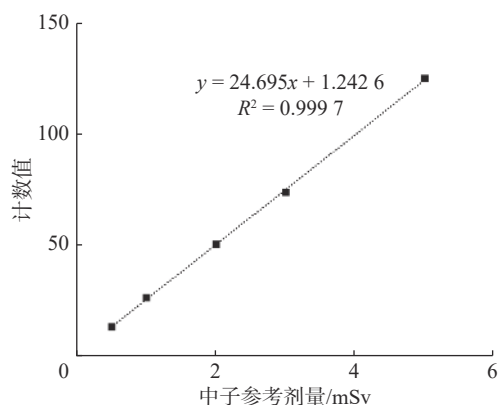


图 1  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  中子刻度曲线

Figure 1 Neutron calibration curve with  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$

2.2 CR39 的刻度结果 采用最小二乘法拟合 CR39 的净径迹密度与中子参考剂量, 可得到中子剂量刻度曲线, 如图 2 所示。CR39 中子刻度曲线的相关系数为 0.9997, 校准系数为 0.0026  $\text{mSv}/(\text{tr} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。

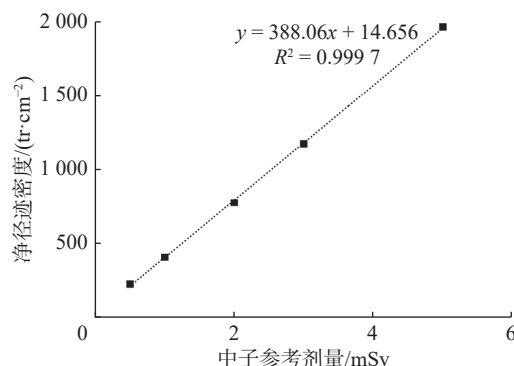


图 2 CR39 中子刻度曲线

Figure 2 Neutron calibration curve with CR39

2.3 最低可探测水平 MDL 根据公式 1) 和 3) 分别计算  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  和 CR39 中子测量系统的 MDL,  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  热释光测量系统的 MDL 为 0.005  $\text{mSv}$  ( $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  热释光测量系统的 MDL 取值为  $^6\text{LiF}$ 、 $^7\text{LiF}$  测量结果中的较高值), CR39 测量系统的 MDL 为 0.04  $\text{mSv}$ 。

2.4 中子个人剂量监测结果 表 2 列出了 7 家单位 26 名放射工作人员的  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  和 CR39 中子个人剂量监测结果。根据监测结果可以得知大部分工作人员的中子个人剂量当量  $H_p(10) < \text{MDL}$ , 26 名人员中有 6 名人员 2 种监测方法的结果存在一定差异。

## 3 讨论

本文随机选取了 7 家单位的 26 名放射工作人员同时采用  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  和 CR39 2 种监测方法进行中子个人剂量监测, 26 名人员中有 6 名人员 2 种监测方法的结果存在一定差异。分析其原因, 可能在于: (1) CR39 受阈能的影响, 对于低于 100 keV 的中子无响应<sup>[1]</sup>; 而  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  的阈能较低, 对热中子较为灵敏<sup>[13,22]</sup>。(2)  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  在低剂量时受探测器分散性的影响会导致  $^6\text{LiF}$  通过  $^7\text{LiF}$  扣除  $\gamma$  响应时可能会出现负值的问题, 导致  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  的监测结果小于 CR39 的监测结果。

对比 2 种监测方法的 MDL 值, 可以看出  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  热释光测量系统的 MDL 值为 CR39 测量系统的 1/8, 表明  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  热释光中子个人剂量测量系统的最低可探测水平低于 CR39 固体核径迹中子测量系统。

对于  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  热释光反照率监测方法, 中子慢化反散射份额会随着中子能量增加而降低,  $> 10 \text{ keV}$  时人体的中子反照率显著下降<sup>[1]</sup>, 导致  $^6\text{LiF-}^7\text{LiF}$  热释

表 2 7 家监测单位人员的<sup>6</sup>LiF-<sup>7</sup>LiF 和 CR39 中子个人剂量监测结果

Table 2 Individual neutron dose monitoring results with <sup>6</sup>LiF-<sup>7</sup>LiF and CR39 of monitored personnel in 7 institutions

监测单位	人员 序号	<sup>6</sup> LiF- <sup>7</sup> LiF 测量中子个人剂 量当量 $H_p(10)/\text{mSv}$	CR39 测量中子个人剂 量当量 $H_p(10)/\text{mSv}$
某同位素医药公司	1	<MDL	0.07
	2	0.38	0.05
	3	<MDL	0.07
某油田测试公司	4	<MDL	<MDL
	5	<MDL	<MDL
	6	<MDL	<MDL
	7	<MDL	<MDL
某微电子有限公司	8	<MDL	<MDL
	9	<MDL	<MDL
某生态环境监测中心	10	<MDL	<MDL
	11	<MDL	<MDL
	12	0.03	<MDL
	13	<MDL	<MDL
	14	<MDL	<MDL
	15	<MDL	<MDL
	16	<MDL	<MDL
	17	<MDL	<MDL
某智能设备公司	18	<MDL	<MDL
	19	<MDL	<MDL
	20	<MDL	<MDL
	21	0.05	0.06
	22	<MDL	<MDL
某环保科技有限公司	23	0.10	<MDL
	24	<MDL	<MDL
某炼石水泥公司	25	0.13	<MDL
	26	<MDL	<MDL

光反照率剂量计对中子个人剂量监测存在高能低估和低能高估的问题,因此该剂量计很难直接应用于快中子辐射场所的个人剂量监测。在利用热释光反照率中子剂量计进行人员监测的过程中,应根据杂散辐射场的能谱特征(如反照中子读数与场所热中子读数之比)求得相应的场所校准因子,从而估算中子个人剂量当量  $H_p(10)$ <sup>[13]</sup>。与<sup>6</sup>LiF-<sup>7</sup>LiF 热释光反照率剂量计一样,目前所使用的<sup>6</sup>LiF-<sup>7</sup>LiF 热释光普通剂量计同样存在高能低估和低能高估的问题,但普通剂量计不能利用反照率的特点获得能谱特性进行合理的估

算。同时,因为普通剂量计无反照率配置,在监测过程中,<sup>6</sup>LiF 探测元件不仅累积反照中子辐射,而且累积了场所热中子辐射<sup>[23]</sup>,可能进一步导致低能高估的问题。德国使用万能反照率剂量计(KFK)进行中子个人剂量监测,该剂量计包括 2 对<sup>6</sup>LiF、<sup>7</sup>LiF 探测元件,位于含 B 塑料上方的<sup>6</sup>LiF、<sup>7</sup>LiF 用来探测场所热中子,位于含 B 塑料下方的<sup>6</sup>LiF、<sup>7</sup>LiF 用来探测反照中子和计算中子个人剂量当量  $H_p(10)$ 。根据场所热中子与反照中子分量之比能获得实际职业中子场的能谱信息,并可计算工作场所中子剂量校准因子,降低了低估或高估中子个人剂量当量的影响<sup>[12]</sup>。目前国内部分单位已经开展反照率剂量计的研制以降低反照率剂量计的使用成本,实现使用反照率剂量计进行中子个人剂量监测的目的。另外,在<sup>6</sup>LiF、<sup>7</sup>LiF 筛选的过程中发现:<sup>6</sup>LiF 在<sup>137</sup>Cs 源和中子源照射下的分散性不一致,建议在<sup>6</sup>LiF 的筛选过程中,要分别在<sup>137</sup>Cs 和中子源照射下进行筛选,降低因探测器的分散性的差别对测量结果的影响。值得注意的是在对<sup>6</sup>LiF、<sup>7</sup>LiF 进行探测器筛选时是分别进行筛选,2 种探测器的分散性不同,在照射剂量较低时,<sup>6</sup>LiF 扣除  $\gamma$  响应时可能会出现负值的现象。

对于 CR39 固体核径迹监测方法,因 CR39 的阈能较高,对能量低于 100 keV 的中子基本无响应,所以不适用于能量低于 100 keV 中子辐射场所的个人剂量监测。目前,日本千代田公司生产的使用氮化硼和高密度聚乙烯结合作为辐照器的全能谱 CR39 中子个人剂量计拓宽了中子监测范围,可测量的中子能量范围为:0.025 eV~15 MeV<sup>[24]</sup>。另外,刻度中子源与实际中子监测场所能谱的差异也是干扰 CR39 固体核径迹监测方法准确度的重要因素。CR39 固体核径迹监测方法常用于快中子辐射场所(如油气田测井)的个人剂量监测<sup>[25-27]</sup>,如果用于宽谱或经过一定程度慢化的中子辐射场所,测量结果存在低估的问题<sup>[28]</sup>。

总之,无论是<sup>6</sup>LiF-<sup>7</sup>LiF 热释光反照率还是 CR39 固体核径迹中子个人剂量监测方法都有其优势,也存在不足。在实际监测过程中,对不同工作场所的人员进行中子个人剂量监测时,需要考虑中子能量和中子源的特性,选择合适的监测方法,以获得较为准确的累积剂量。

鉴于实验条件的限制,仅对 7 家单位的 26 名放射工作人员一个监测周期的监测结果进行 2 种监测方法的对比分析,存在一定的局限性。但是,通过对



2 种监测方法的比较分析,可以发现目前中子个人剂量监测过程中存在的一些问题,可为完善中子个人剂量监测方法提供部分参考。

**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** 徐健负责研究结果测读、分析,文献检索、整理及文章撰写;武云云、郭文负责指导文章写作及修改;翟贺争、王曼瑶、张琪负责研究的实施;丁艳秋负责提出研究内容、设计研究方案、指导文章写作及修改

## 参考文献

- [1] 曹磊,邓君,兰长林,等.基于CR39固体核径迹探测器的低能中子剂量测量方法初步研究[J].辐射防护,2017,37(3):174-179.  
Cao L, Deng J, Lan CL, et al. Study on dosimetric method of low energy neutron with CR39 solid state nuclear track detector[J]. Radiat Prot, 2017, 37(3): 174-179.
- [2] Tang JY, An Q, Bai JB, et al. Back-n white neutron source at CSNS and its applications[J]. Nucl Sci Tech, 2021, 32(1): 11. DOI: 10.1007/s41365-021-00846-6.
- [3] Kiyanaagi Y. Neutron applications developing at compact accelerator-driven neutron sources[J]. AAPPS Bull, 2021, 31(1): 22. DOI: 10.1007/s43673-021-00022-3.
- [4] Attallah MF, Mohamed GY, Breky MME. Production and subsequent separation of  $^{47}\text{Sc}$  of nuclear medicine applications using neutron-induced reactions on different natural targets[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2022, 331(4): 1723-1730. DOI: 10.1007/s10967-022-08232-1.
- [5] 郭志琦,刘昌奇,张炜忠,等.基于加速器 $^7\text{Li}(p,n)$ 反应的BNCT中子源及慢化体的优化设计[J].核技术,2022,45(5):9-17. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050201.  
Guo ZQ, Liu CQ, Zhang WZ, et al. Optimization design of BNCT neutron source and moderating body based on accelerator  $^7\text{Li}(p,n)$  reaction[J]. Nucl Tech, 2022, 45(5): 9-17. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.050201.
- [6] 姚泽恩,王俊润,张宇,等.兰州大学的中子发生器研制及应用展望[J].原子能科学技术,2022,56(9):1840-1852. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0445.  
Yao ZE, Wang JR, Zhang Y, et al. Development and application of neutron generator at Lanzhou University[J]. At Energy Sci Technol, 2022, 56(9): 1840-1852. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0445.
- [7] 柴栋静,党旭红,左雅慧.中子的相对生物学效应及复合效应研究现状[J].中国辐射卫生,2021,30(6):788-793. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.06.025.  
Chai DJ, Dang XH, Zuo YH. Current research on the relative biological effects and compound effects of neutron[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30(6): 788-793. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.06.025.
- [8] Amit G, Even-Hen O, Awad O, et al. A performance study of a new personal neutron dosimetry system at SNRC[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2020, 189(2): 242-252. DOI: 10.1093/rpd/ncaa036.
- [9] Bolzonella M, Ambrožová I, Caresana M, et al. Neutron personal dosimetry using polyallyl diglycol carbonate (PADC): Current status, best practices and proposed research[J]. Phys Open, 2022, 12: 100114. DOI: 10.1016/j.physo.2022.100114.
- [10] Gómez-Ros JM, Bedogni R, Domingo C. Personal neutron dosimetry: state-of-the-art and new technologies[J]. Radiat Meas, 2023, 161: 106908. DOI: 10.1016/j.radmeas.2023.106908.
- [11] 郑玉宏,李桃生,宫存溃,等.热释光中子个人剂量计蒙特卡罗设计[J].核电子学与探测技术,2010,30(10):1367-1371,1397. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.10.023.  
Zheng YH, Li TS, Gong CK, et al. Monte Carlo design for TLD personal neutron dosimeter[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2010, 30(10): 1367-1371,1397. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2010.10.023.
- [12] Ferreira MS, Silva ER, Mauricio CLP. Assessment of neutron  $H_p(10)$  using workplace correction factors obtained through Monte Carlo simulation for alnor albedo dosimeter[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2022, 198(16): 1219-1229. DOI: 10.1093/rpd/ncac162.
- [13] 刘琼瑶.宽能谱中子热释光个人剂量计的研制[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013. DOI: 10.7666/d.D429502.  
Liu QY. Development of thermoluminescence neutron personal dosimeter for broad spectrum[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. DOI: 10.7666/d.D429502.
- [14] Guo SL, Chen BL, Durrani SA. Solid-state nuclear track detectors[M]//L'Annunziata MF. Handbook of Radioactivity Analysis. 4th Ed. Academic Press, 2020: 307-407. DOI: 10.1016/B978-0-12-814397-1.00003-0.
- [15] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. GBZ 128—2019 职业性外照射个人监测规范[S].北京:中国标准出版社,2019.  
National Health Commission of the People's Republic of China. GBZ 128—2019 Specifications for individual monitoring of occupational external exposure[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 148—2002 用于中子测井的CR39中子剂量计的个人剂量监测方法[S].北京:法律出版社,2004.  
Ministry of Health of the People's Republic of China. GBZ/T 148—2002 Individual dose monitoring method with CR-39 neutron dosimeter using in neutron logging[S]. Beijing: Law Press China, 2004.
- [17] 国家国防科技工业局. JJG(军工)35—2014 个人监测用热释光反照率中子剂量测量系统检定规程[S].北京:中国计量出版社,2014.  
State Administration of Science, Technology and Industry for

- National Defence.PRC. JJG(Military industry)35-2014 Verification Regulation for thermoluminescence albedo neutron dosimetry system for personal monitoring[S]. Beijing: Metrology Press of China, 2014
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ 207—2016 外照射个人剂量系统性能检验规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of PRC. GBZ 207—2016 Testing criteria of personnel dosimetry performance for external exposure[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [19] Donya H. Thermoluminescence dosimetry technique for radiation detection applications[M]//FitzGerald TJ, Bishop-Jodoin M. Dosimetry. London: IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.102728.
- [20] 李洋, 夏晓彬, 曹振, 等. CR-39应用于中子探测的化学蚀刻条件优化研究[J]. 核技术, 2016, 39 (6): 060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060402.
- Li Y, Xia XB, Cao Z, et al. An experimental study on optimal chemical etching condition for CR-39 used in neutron detection[J]. Nucl Tech, 2016, 39 (6): 060402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.060402.
- [21] 翟贺争, 张继勉, 曹磊, 等. TASLIMAGE固体核径迹测量系统监测中子个人剂量的应用研究[J]. 中国医学装备, 2014, 11 (3): 1-3,4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2014.03.001.
- Zhai HZ, Zhang JM, Cao L, et al. Application research on solid state nuclear track TASLIMAGE system on neutron individual dose monitoring[J]. Chin Med Equip, 2014, 11 (3): 1-3,4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2014.03.001.
- [22] 陈朝阳, 巴维真, 何承发. 热中子注量率测量方法研究[J]. 核技术, 2004, 27 (2): 104-107. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2004.02.006.
- Chen CY, Ba WZ, He CF. Study on measuring method of thermal neutron fluence rate[J]. Nucl Tech, 2004, 27 (2): 104-107. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2004.02.006.
- [23] 鲁永杰, 王月兴, 杨翊方. 个人中子剂量计[J]. 中国辐射卫生, 2001, 10 (4): 200-201. DOI: 10.3969/j.issn.1004-714X.2001.04.004.
- Lu YJ, Wang YX, Yang YF. Personal neutron dosimeter[J]. Chin J Radiol Health, 2001, 10 (4): 200-201. DOI: 10.3969/j.issn.1004-714X.2001.04.004.
- [24] Chiyoda Technol Corporation. Wide-range neutron pit<sub>(WNP)</sub> system[EB/OL].(2021-12)[2023-10-17].[https://www.c-technol.co.jp/en/pdf/file\\_widerange\\_5th\\_Edition.pdf](https://www.c-technol.co.jp/en/pdf/file_widerange_5th_Edition.pdf).
- [25] Bolzonella M, Caresana M, Ferrarini M. A self-consistent FLUKA algorithm for studying the response of passive dosimeters based on CR-39 track detectors in fast neutron fields[J]. Radiat Meas, 2020, 138: 106456. DOI: 10.1016/j.radmeas.2020.106456.
- [26] Bolzonella M, Caresana M, Ferrarini M, et al. Characterization of a novel passive personal fast neutron dosimeter based on a CR-39 track detector in monochromatic neutron fields via Monte Carlo simulations and experiments[J]. Radiat Meas, 2021, 146: 106627. DOI: 10.1016/j.radmeas.2021.106627.
- [27] Sathian D, Pal R, Bakshi AK, et al. A study on the optimization of processing parameters of boron-doped CR-39 solid-state nuclear track detectors for response to thermal neutrons[J]. Radiat Prot Environ, 2022, 45 (1): 22-27. DOI: 10.4103/rpe.rpe\_28\_21.
- [28] 曹磊, 邓君, 张贵英, 等. CR39中子个人剂量计性能实验研究[J]. 辐射防护, 2012, 32 (2): 103-107.
- Cao L, Deng J, Zhang GY, et al. Study on performance test of CR39 personal dosimeter for fast neutron[J]. Radiat Prot, 2012, 32 (2): 103-107.

(收稿日期:2023-07-09)