



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2307847

引用格式:李潇潇,杨青,谷懿,等.消除剂量响应差异的热释光剂量测量方法[J].科学技术与工程,2025,25(2):592-597.

Li Xiaoxiao, Yang Qing, Gu Yi, et al. Thermoluminescent dosimetry for eliminating dose response differences[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 592-597.

## 原子能技术

# 消除剂量响应差异的热释光剂量测量方法

李潇潇<sup>1,2</sup>, 杨青<sup>3</sup>, 谷懿<sup>1\*</sup>, 王猛<sup>1</sup>, 徐立鹏<sup>4</sup>, 朱小铰<sup>5</sup>, 张欣熠<sup>1,2</sup>

(1. 成都理工大学地球核技术四川省重点实验室, 成都 610059; 2. 四川中核同源科技有限公司, 乐山 614100;

3. 上海市市场监督管理局行政服务中心, 上海 200040; 4. 四川肿瘤医院, 成都 610041;

5. 四川省辐射环境管理监测中心站, 成都 611139)

**摘要** 使用热释光探测器进行辐射剂量监测是目前中国个人或环境剂量监测的主要方法之一。为解决热释光探测器在使用前需进行均匀性筛选以及测量过程复杂的问题,通过引入试验剂量,对热释光峰计数进行归一化处理,消除了热释光探测器剂量响应差异的影响,优化了现行热释光剂量的测量流程。配合简易辐照装置,使用优化测量流程和现行一般测量流程对同一批辐射环境监测的热释光剂量计进行测量,两者剂量值相对误差处于 $\pm 5\%$ 以内,能够满足热释光剂量计在个人或环境电离辐射剂量监测过程中的准确度要求。并且优化后的热释光剂量测量流程无需均匀性筛选,降低了探测器均匀性性能要求,提升了测量流程的适用性,为中国的个人或环境剂量监测提供了一种高精度、高效率、低成本的测量方法。

**关键词** 热释光; 剂量监测; 电离辐射; 环境监测; 热释光探测器

中图分类号 TL818;

文献标志码 A

## Thermoluminescent Dosimetry for Eliminating Dose Response Differences

LI Xiao-xiao<sup>1,2</sup>, YANG Qing<sup>3</sup>, GU Yi<sup>1\*</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, XU Li-peng<sup>4</sup>, ZHU Xiao-jiao<sup>5</sup>, ZHANG Xin-yi<sup>1,2</sup>

(1. Applied Nuclear Techniques in Geosciences Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, China; 2. Sichuan Tongyuan Technology Co., Leshan 614100, China; 3. Administrative Service Center

of Shanghai Municipal Administration for Market Regulation, Shanghai 200040, China; 4. Sichuan Cancer Hospital,

Chengdu 610041, China; 5. Sichuan Management and Monitoring Center Station of Radioactive Environment, Chengdu 611139, China)

**[Abstract]** Radiation dose monitoring using thermoluminescent detectors is currently one of the main methods of personal or environmental dose monitoring in China. In order to solve the problem of uniformity screening before the use of thermoluminescent detector, and the complexity of the measurement process. Test dose and thermoluminescent peak counts normalization were used to optimize the measurement process of thermoluminescent detectors. With the simple irradiation device, the same batch of thermoluminescent dosimeters for radiation environment monitoring were measured using the optimized and general measurement processes. The relative error of the dose values of the two was within  $\pm 5\%$ , which satisfied the accuracy requirements of thermoluminescent dosimeters in the process of monitoring the dose of ionizing radiation to the individual or the environment. The results show that the optimized thermoluminescent dosimetry process reduces detector uniformity performance requirements and improves the applicability of the process. It provides a high-precision, high-efficiency and low-cost measurement method for personal or environmental dose monitoring in China.

**[Keywords]** thermoluminescence; dose monitoring; ionizing radiation; environmental monitoring; thermoluminescent detector

随着核工业体系的快速发展,核技术已经广泛应用在能源、医疗、工业、农业等领域中。对人员和环境的辐射剂量监测,是保障公众/职业人员辐射

安全的重要手段<sup>[1-5]</sup>。目前,在职业照射防护、个人/环境剂量监测等领域,主要使用热释光/光释光探测器进行剂量监测<sup>[6-7]</sup>。北京解放军防化研究院

收稿日期: 2023-10-09; 修订日期: 2024-10-17

基金项目: 四川省生态环境保护科技计划(2021HB11); 四川省青年科技创新研究团队项目(2021JDTD0018); 中国核工业地质局铀矿地质项目(202205-6); 四川省自然科学基金(23NSFSC0116)

第一作者: 李潇潇(1995—),男,汉族,四川乐山人,硕士研究生。研究方向:核技术及应用。E-mail:Lixiaoxiao95@qq.com。

\*通信作者: 谷懿(1982—),男,汉族,江西新余人,博士,教授。研究方向:核技术及应用、核勘察技术。E-mail:guiyi10@edut.edu.cn。

生产的 LiF(Mg、Cu、P) 材质的 GR200A 型热释光探测器,因其能量响应较好、灵敏度高、量程范围宽和易于测量、价格低廉等优点,在中国个人和环境辐射监测领域得到广泛应用<sup>[8-10]</sup>。

现有热释光剂量测量流程按照 GB/T 10264—2014《个人和环境监测用热释光剂量测量系统》标准中对变异系数的要求,在使用之前对探测器进行一致性检定。变异系数合格的热释光探测器再使用标准辐照装置辐照刻度剂量计算该批热释光探测器的刻度因子<sup>[11-12]</sup>。上述两个步骤对热释光剂量监测起到了严格校正的作用,但筛选过程会淘汰一部分热释光探测器造成监测成本升高、资源浪费。刻度过程需使用标准辐照装置且测量过程复杂,考虑到使用效率与安全性,辐射监测部门难以配备标准辐照装置。此外,若热释光探测器在剂量监测过程中剂量响应发生变化,依据原有的刻度因子将无法得出准确的辐射剂量监测结果<sup>[13]</sup>。

针对热释光剂量测量流程存在的问题,现通过分析热释光探测器的热释光特性,对现有的热释光剂量测量方法展开优化研究,并对优化后的测量流程进行效果验证。

## 1 热释光探测器性能分析

GR200A 热释光探测器主要依靠热释光磷光体储存所接收的辐射剂量<sup>[14]</sup>,但由于在生产、加工过程中,难以保证不同批次热释光探测器之间的热释光磷光体浓度的一致性,从而导致不同探测器的剂量响应可能存在差异<sup>[13,15]</sup>。因此,热释光探测器在使用前需要经过均匀性筛选,满足变异系数指标要求后进行刻度获得该批热释光探测器的刻度因子才能用于辐射剂量监测<sup>[16]</sup>。

### 1.1 稳定性测试

随机选取同一批次 4 个 GR200A 热释光探测器进行稳定性测试,退火后使用<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y  $\beta$  源辐照 0.2 Gy,并进行热释光测量,连续循环 10 次,统计每次测量所得到的热释光峰计数,对热释光探测器在重复测量过程中热释光峰计数的稳定性进行评价,测量结果如图 1 所示。连续 10 次测量所得出的热释光峰计数波动较小,4 个热释光探测器热释光峰计数的变异系数分别为 1.63%、0.78%、0.87% 和 2.49%,热释光剂量计的计数在 10 次重复测量过程中几乎未发生变化,能够满足热释光探测器对个人/环境剂量测量的稳定性要求。

### 1.2 剂量线性

选取不同批次的 4 个 GR200A 热释光探测器进行退火。随后,对每个热释光探测器依次使用

<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y  $\beta$  源辐照 0.1 ~ 1 Gy,且重复 10 次,每次循环增加 0.1 Gy。辐照完成后,进行热释光测量并统计热释光峰计数,结果如图 2 所示。测量结果表明,当热释光探测器使用<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y  $\beta$  源辐照 0.1 ~ 1 Gy 时,热释光峰计数与所接受的辐照剂量具有较高的线性相关性,二者的线性相关性  $R^2$  均优于 0.99。

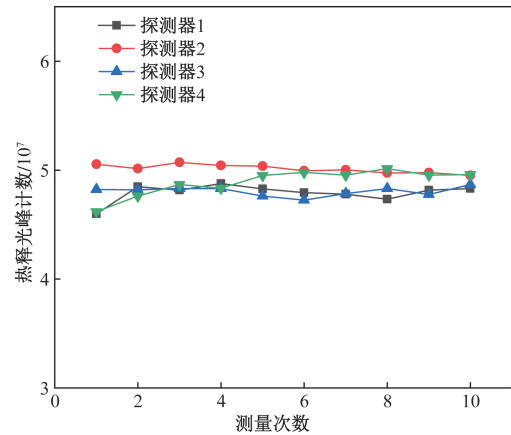


图 1 GR200A 热释光探测器稳定性测试结果  
Fig. 1 Stability test results of GR200A thermoluminescent detectors

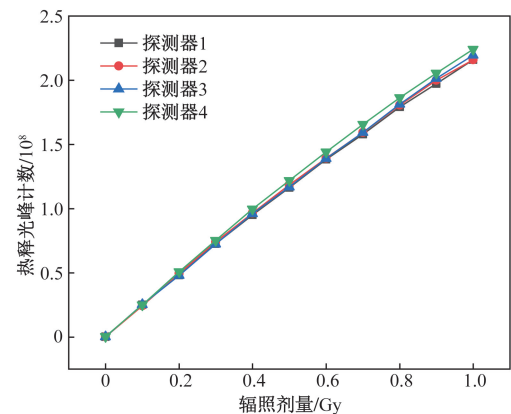


图 2 不同热释光探测器的剂量响应曲线  
Fig. 2 Dose response curves of different thermoluminescent detectors

### 1.3 剂量响应差异

随机选取未经均匀性筛选的不同批次的 16 个 GR200A 热释光探测器,退火后对所选取的热释光探测器使用<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y  $\beta$  源辐照相同剂量,并进行热释光测量,统计其热释光峰计数,结果如图 3 所示。不同热释光探测器之间剂量响应差别较大,变异系数达到 14.16%,不同批次之间的热释光探测器无法混合使用,直接使用会导致剂量监测结果的准确度降低。按照现有测量流程中对热释光探测器变异系数低于 5% 的要求<sup>[16]</sup>,上述热释光探测器将不能用于辐射剂量的监测,在一定程度上增加了使用热释光探测器进行个人/环境辐射剂量的监测成本。

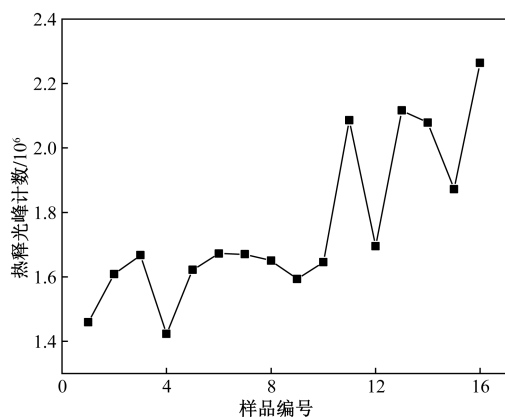


图3 不同热释光探测器剂量响应差异  
Fig. 3 Difference in dose response of different thermoluminescent detectors

## 2 热释光剂量测量流程优化

### 2.1 优化的理论基础

热释光探测器的应用需要定量确定探测器的热释光峰计数与剂量值之间的关系,这一过程称为刻度。剂量值  $D$  的计算公式为

$$D = Lk \quad (1)$$

式(1)中: $L$ 为热释光峰计数; $k$ 为刻度因子。

对于不同批次热释光探测器,磷光体浓度差异是导致探测器之间剂量响应差异的主要原因,即刻度因子  $k$  的不同。在 GR200A 热释光探测器良好的稳定性及剂量线性响应能力的基础上,可通过采用热释光峰计数归一化方法降低不同热释光探测器之间的剂量响应差异,使不同批次热释光探测器能够满足个人/环境剂量监测中对热释光探测器变异系数的测量需求。热释光峰计数归一化是指在待测剂量  $D_L$  的基础上,再对热释光探测器照射一个较小的试验剂量  $D_T$ 。

$$\frac{D_L}{D_T} = \frac{Lk}{Tk} \quad (2)$$

式(2)中: $T$ 为试验剂量的热释光峰计数。

$$D_L = \frac{L}{T} D_T \quad (3)$$

相比于常规方法中使用的热释光峰计数, $L/T$  仅与热释光探测器的剂量线性有关,与热释光探测器所含磷光体浓度无关,使用  $L/T$  进行归一化能够消除不同热释光探测器之间因所含磷光体浓度差异引起的剂量响应差异。

选取 40 个不同批次的 GR200A 热释光探测器,使用  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$   $\beta$  源依次照射 0.2 Gy 的人工剂量与 0.1 Gy 的试验剂量并测量其对应的热释光峰计数,以及计算热释光峰计数归一化均匀性筛选方

法所需的  $L/T$ 。两种热释光剂量计均匀性筛选方法的对比结果如图 4 所示,原有热释光探测器均匀性筛选方法下该组热释光探测器对应的变异系数为 18.68%,而热释光峰计数归一化的均匀性筛选方法所对应的变异系数为 3.02%,远低于个人/环境剂量监测中对热释光探测器变异系数的测量需求。

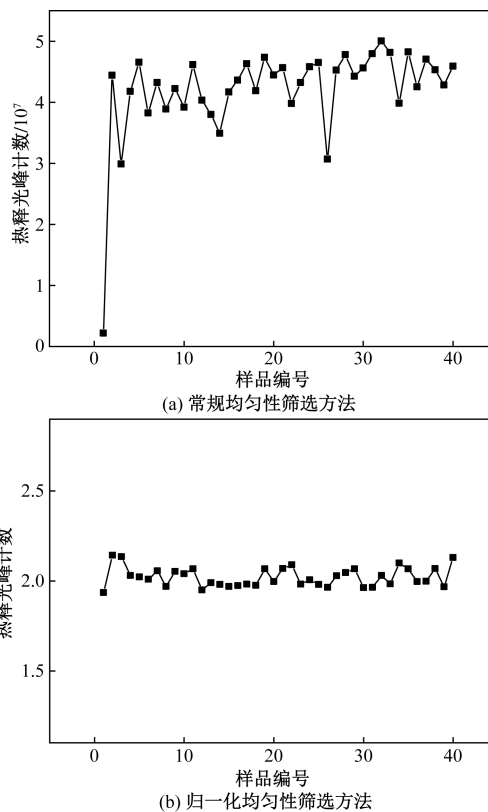


图4 不同批次热释光探测器在相同辐射剂量下的测量结果  
Fig. 4 Measurements of different batches of thermoluminescent detectors at the same radiation dose

两种热释光探测器均匀性筛选方法表明当采用热释光计数归一化方法进行辐射剂量测量时,能够去除热释光探测器之间因磷光体浓度差异所引起的剂量响应差异,若不同批次热释光探测器的热释光峰计数与剂量之间均具有良好的剂量线性响应,热释光探测器之间的变异系数必然能够满足个人/环境剂量监测的测量需求。因此,热释光峰计数归一化方法的引入能够降低不同批次热释光探测器之间因剂量响应差异带来的影响,降低监测成本,提升热释光剂量计在个人/环境剂量监测中的准确性。

### 2.2 测量流程优化

中国现阶段广泛使用的 GR200A 热释光探测器在进行个人/环境辐射剂量测量时,现有的常规测量流程如表 1 所示。常规测量流程中除均匀性筛选

表 1 GR200A 热释光探测器的辐射剂量测量流程

Table 1 Radiation dose measurement process of GR200A thermoluminescent detectors

实验步骤	常规测量流程	优化测量流程
1	热释光探测器退火, 并辐照人工剂量	—
2	读出热释光探测器 240 °C 释光计数	—
3	热释光探测器均匀性筛选	—
4	热释光探测器退火, 并辐照刻度剂量	热释光探测器退火, 并辐照试验剂量 $D_T$
5	读出热释光探测器 240 °C 释光计数	进行等效剂量测量, 得到试验剂量 $D_T$ 的准确剂量值
6	计算该批热释光探测器所对应的刻度因子 $k$	热释光探测器退火, 并放置于待监测区域
7	热释光探测器退火, 并放置于待监测区域	监测周期结束后, 读出热释光探测器 240 °C 释光计数 $L$
8	监测周期结束后, 读出热释光探测器 240 °C 释光计数	退火后辐照试验剂量 $D_T$ , 并读出 240 °C 释光计数 $T$
9	计算热释光探测器所接受电离辐射的总剂量 $D$	计算热释光探测器所接受的电离辐射的总剂量 $D$

流程造成热释光辐射剂量监测成本升高, 操作复杂外, 在常规测量流程中获取的热释光探测器刻度因子的使用范围仅适用于热释光剂量计在刻度后, 其剂量响应没有发生变化的前提下使用。一旦在监测周期内或监测结果测量时热释光探测器受到周围环境中温度、湿度和测量温度等因素影响<sup>[13]</sup>, 剂量响应发生变化, 则前期获取的刻度因子将带入较大误差, 导致无法准确获取监测剂量值。

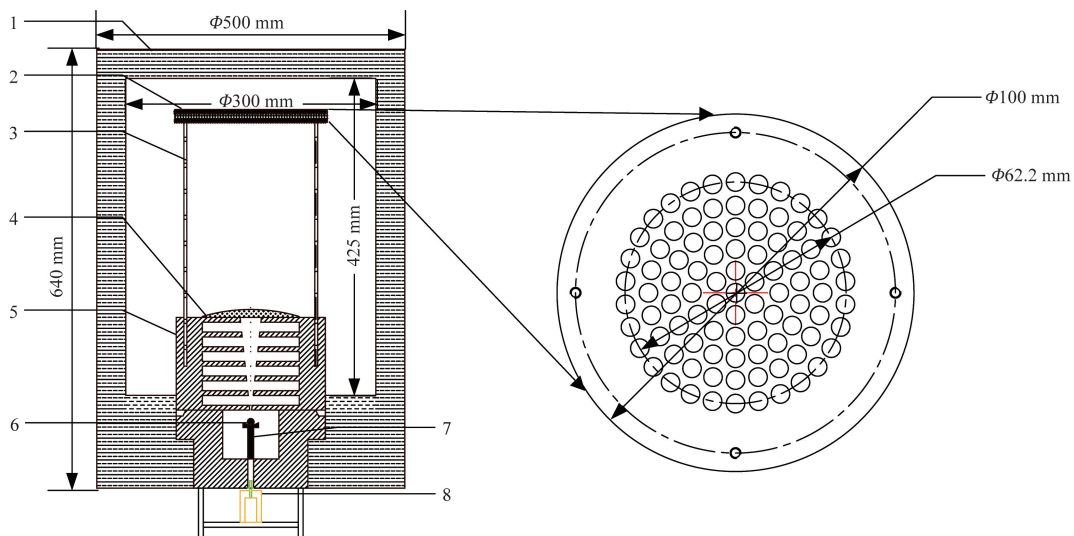
以现有的 GR200A 热释光探测器辐射剂量测量流程中存在的问题为出发点, 引入热释光峰计数归一化的测量方法, 对现有的测量流程做出相应的优化。优化后的热释光剂量计测量流程如表 1 所示, 直接对热释光探测器辐照一个固定的试验剂量  $D_T$ , 对其进行等效剂量测量得到准确剂量值。在电离辐射监测完成之后辐照同样的试验剂量  $D_T$ , 根据  $L/T$  计算出热释光探测器所接受电离辐射的总剂量  $D_T$ 。优化后的方法省略了剂量计筛选的环节,  $L/T$  因为与热释光剂量计的剂量响应无关, 只要试验剂量  $D_T$  不变, 仅需刻度一次, 所有热释光探测器均可

使用, 即使在辐射监测过程中由于其他因素影响导致的热释光探测器剂量响应变化, 也能准确地测量出电离辐射剂量。

### 2.3 试验剂量辐照装置

优化后的测量流程需要辐照一个固定的试验剂量, 因此设计了一套试验剂量辐照装置, 本装置主要由放射源、散射腔、准直器、屏蔽室、热释光托盘、低转速电机、弧形衰减器组成, 结构如图 5 所示。参考辐射场中的热释光探测器吸收剂量的蒙特卡罗模拟结果显示, 散射射线贡献率为照射野范围剂量平均值的 0.97%, 满足相关标准要求。热释光托盘的直径 100 mm, 样品位置最外层直径 62.2 mm, 分为 6 圈, 共计能够辐照 91 个样品。辐照装置实物图如图 6 所示。

选取 30 片热释光探测器均匀放置于热释光托盘中, 除中心点外每圈均匀放置 6 片热释光剂量计, 重复辐照 5 次并测量其热释光峰计数。结果显示, 同圈热释光探测器的热释光峰计数不均匀性小于 3%, 满足需求。



1 为屏蔽室; 2 为热释光托盘; 3 为热释光托盘支架; 4 为弧形衰减器; 5 为准直器; 6 为放射源; 7 为放射源支撑块; 8 为慢速电机

图 5 辐照装置设计图

Fig. 5 Irradiator design drawing



(a) 辐照装置屏蔽体

(b) 准直器

图6 辐照装置实物图

Fig. 6 Physical drawing of irradiator

### 3 效果验证

通过对四川省辐射环境管理监测中心站(以下简称辐射监测站)的一批环境辐射监测热释光剂量计使用两种测量流程进行测量,来验证本研究所优化的热释光剂量测量流程的效果。每一个监测点位的热释光剂量计分为两部分:一部分使用优化测量流程测量,另一部分由辐射监测站使用现有测量流程进行测量。

首先在辐照装置中对热释光探测器辐照试验剂量  $D_T$ ,送往辐射监测站进行等效剂量测量,获得其准确剂量值。对采用优化测量方法的热释光剂量计进行测量并统计热释光峰计数  $L$ ;退火后对其辐照同一试验剂量  $D_T$ ,测量并统计热释光峰计数  $T$ 。依据  $L$  与  $T$  的比值,计算出该批热释光剂量计在环境剂量监测过程中所接受的电离辐射剂量,与辐射监测站采用常规流程测量的另一批热释光剂量计剂量值进行对比,如表2所示。结果显示,优化后的测量流程的测量值与辐射监测站的测量值相比较,同一地点的热释光剂量计测量结果的相对误差均处于  $\pm 5\%$  以内,基本处于同一水平。优化流程

表2 优化测量流程与常规流程的剂量测量结果对比

Table 2 Comparison of dosimetric results between optimized and conventional measurement processes

点位	常规流程		优化流程		相对误差/%
	测量值/ mGy	变异系数/ %	测量值/ mGy	变异系数/ %	
成都 A	1.01	1.94	1.03	2.30	1.98
成都 B	0.98	1.15	0.98	1.66	0.00
绵阳 B	1.07	1.71	1.08	2.84	0.93
广元 A	0.97	2.11	0.98	1.90	1.03
广元 B	0.84	2.92	0.87	1.77	3.57
宜宾 B	1.02	0.89	1.07	1.16	4.90
南充 A	0.90	1.91	0.90	1.30	0.00
南充 B	0.94	2.79	0.93	0.69	-1.06

测量值的变异系数小于5%,满足电离辐射环境监测要求。

### 4 结论

通过引入试验剂量,采用热释光峰计数归一化方法,能够消除探测器之间剂量响应差异给测量结果带来的影响,实现热释光探测器无需进行均匀性筛选即可用于电离辐射剂量监测。在此基础上优化的热释光剂量测量流程,使热释光探测器即使在监测周期内或监测结果测量的过程中因受周围环境因素影响导致自身剂量响应发生变化的情况下,仍能准确地测量出监测对象的剂量值。优化测量流程在保证辐射剂量监测的准确度的情况下,可以降低相关企业/监管部门对于辐射监测的成本投入,简化了热释光辐射剂量监测流程。这种高精度、高效率、低成本的热释光剂量测量方法,有效提升中国热释光剂量监测水平,为中国热释光剂量监测领域提供新的技术支持。

### 参考文献

- [1] Nika G, Michael F, Saravanabavaan S, et al. Radiation dose monitoring in the clinical routine[J]. Fortschritte auf dem Gebiete der Rontgenstrahlen und der Nuklearmedizin, 2017, 189(4): 356-360.
- [2] 范胜男,王拓,李梦雪,等. 2017年我国放射工作人员职业性外照射个人剂量水平与分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2021, 41(2): 85-91.  
Fan Shengnan, Wang Tuo, Li Mengxue, et al. Analysis of individual doses to radiation workers from occupational external exposure in China in 2017[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2021, 41(2): 85-91.
- [3] 周文珊,王芳,易文峰,等. 湖北省2009—2018年放射工作人员职业性外照射剂量监测结果分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2021, 41(2): 122-127.  
Zhou Wenshan, Wang Fang, Yi Wenfeng, et al. Analysis of occupational external exposure dose monitoring results for radiation workers in Hubei Province from 2009 to 2018[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2021, 41(2): 122-127.
- [4] Knežević E, Majer M, Baranowska Z, et al. Investigations into the basic properties of different passive dosimetry systems used in environmental radiation monitoring in the aftermath of a nuclear or radiological event[J]. Radiation Measurements, 2021, 146: 106615.
- [5] 刘冲,廖旭辉,杨彬华,等. 无线通信技术在低功耗  $\gamma$  剂量率监测仪中的应用[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(6): 1339-1343.  
Liu Chong, Liao Xuhui, Yang Binhua, et al. Wireless communication tech applied to low power-consumed  $\gamma$ -dose rate monitor instrument[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(6): 1339-1343.
- [6] 梁萍,朱月红,文继华.  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ :C 晶体热释光曲线和线性调制光释光曲线相似性研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(6): 60-62.

- Liang Ping, Zhu Yuehong, Wen Jihua. Similarity study of thermoluminescence and linear modulation photoluminescence curves of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$  crystals[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14: 60-62.
- [7] 任旭平, 许浒, 韩少华, 等. 光释光技术的应用现状与进展[J]. *核电子学与探测技术*, 2015, 35(10): 1002-1006, 1010.  
Ren Xuping, Xu Hu, Han Shaohua, et al. Application status and progress of OSL techniques home and abroad[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2015, 35: 1002-1006, 1010.
- [8] 王旭, 程瑛, 漆明森, 等.  $\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})$  热释光探测器剂量性能研究[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47(10): 1888-1891.  
Wang Xu, Cheng Ying, Qi Mingsen, et al. Study on dose performance of  $\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})$  thermoluminescence detectors[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(10): 1888-1891.
- [9] Tang K, Cui H, Zhu H, et al. Newly developed highly sensitive  $\text{LiF}:\text{Mg}, \text{Cu}, \text{Si}$  TL discs with good stability to heat treatment[J]. *Radiation Measurements*, 2012, 47(2): 185-189.
- [10] 宫增艳, 赵广翠, 李雪贞, 等. 不同方法监测环境  $\gamma$  辐射剂量率的结果比较与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2018, 27(1): 69-73.  
Gong Zengyan, Zhao Guangcui, Li Xuezheng, et al. Comparison and analysis of environmental  $\gamma$ -radiation levels by using different monitoring methods[J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2018, 27(1): 69-73.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 个人和环境监测用 X、 $\gamma$  辐射热释光剂量测量系统: JJG 593—2016[S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Thermoluminescence dosimetry systems used in personal and environmental monitoring for X and  $\gamma$  radiation: JJG 593—2016[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2016.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 个人和环境监测用热释光剂量测量系统: GB/T 10264—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Thermoluminescence dosimetry systems for personal and environmental monitoring: GB/T 10264—2014[S]. Beijing: Standard Press of China, 2015.
- [13] 黄铭, 张辉, 康宁, 等. 异常环境因素对热释光剂量计的影响[J]. *辐射防护*, 2023, 43(S1): 33-38.  
Huang Ming, Zhang Hui, Kang Ning, et al. Effects of abnormal environmental factors on thermoluminescence dosimeter[J]. *Radiation Protection*, 2023, 43(S1): 33-38.
- [14] 曾嵘, 张伟, 张海黔. 基于茜素红 S 水溶液的  $\gamma$  射线辐射剂量计新机理的研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(16): 58-63.  
Zeng Rong, Zhang Wei, Zhang Haiqian. New mechanism of alizarin red S aqueous solution as  $\gamma$ -ray radiation dosimeter[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(16): 58-63.
- [15] 陈劲民, 李永强, 熊正焯, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}, \text{LiF}:\text{Mg}, \text{Ti}$  和  $\text{LiF}:\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P}$  对本底辐射的热释光响应比较[J]. *核技术*, 2012, 35(2): 109-112.  
Chen Jingmin, Li Yongqiang, Xiong Zhengye, et al. Thermoluminescence comparison among  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}, \text{LiF}:\text{Mg}, \text{Ti}$  and  $\text{LiF}:\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P}$  for natural radiation background measurement[J]. *Nuclear Techniques*, 2012, 35(2): 109-112.
- [16] 国家卫生和计划生育委员会. 外照射个人剂量系统性能检验规范: GBZ 207—2016[S]. 北京: 中国国家标准出版社, 2016.  
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Testing criteria of personal dosimetry performance for external exposure: GBZ 207—2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016.