

# 便携式 $\gamma$ 谱仪在放射工作人员甲状腺 $^{131}\text{I}$ 监测中的应用

彭玄, 张建峰, 拓飞, 杨宝路

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

**摘要:** 目的 将 InSpector 1000 便携式  $\gamma$  谱仪及其相应配套软件应用于放射工作人员甲状腺 $^{131}\text{I}$  活度的监测中, 监测核医学科放射工作人员内照射剂量。方法 对谱仪进行刻度并参加了美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室发起的 2018 年甲状腺放射性碘比对计划, 确保测量的准确性; 利用该谱仪分别对北京市与济南市的 2 家三甲医院核医学科放射工作人员进行测量以验证方法的可行性。结果 该 InSpector 1000 便携式  $\gamma$  谱仪参加国际比对的结果合格。北京市某三甲医院的测量结果显示 10 名放射工作人员的甲状腺 $^{131}\text{I}$  活度均低于最小可探测活度(33.30 Bq), 济南市某三甲医院的测量结果显示 4 名放射工作人员的甲状腺 $^{131}\text{I}$  活度分别为 64.05 Bq、160.77 Bq、416.67 Bq、低于最小可探测活度(35.18 Bq), 4 名被测对象中有 3 人的甲状腺内监测到 $^{131}\text{I}$ , 其对应的甲状腺待积器官剂量分别为 0.70  $\mu\text{Sv}$ 、1.77  $\mu\text{Sv}$ 、4.58  $\mu\text{Sv}$ 。结论 将 InSpector 1000 便携式  $\gamma$  谱仪应用于核医学科放射工作人员甲状腺 $^{131}\text{I}$  监测的可行性强, 该谱仪在辐射监测领域有很好的应用前景, 可在放射防护领域、核应急现场检测领域发挥重要作用。

**关键词:** 便携式  $\gamma$  谱仪;  $^{131}\text{I}$ ; 甲状腺; 辐射监测

中图分类号: TL817 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)01-0034-04

## Application of portable $\gamma$ -ray spectrometer in monitoring thyroid $^{131}\text{I}$ in radiation workers

PENG Xuan, ZHANG Jianfeng, TUO Fei, YANG Baolu

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

**Abstract:** **Objective** To apply InSpector 1000 portable  $\gamma$  spectrometer and its corresponding supporting software to the monitoring of thyroid  $^{131}\text{I}$  activity of radiation workers, and to estimate the internal radiation dose of medical staff in nuclear medicine department. **Methods** The spectrometer was calibrated and taken to participate in the 2018 thyroid radioactive iodine intercomparison program initiated by Lawrence Livermore National Laboratory in the United States to ensure the accuracy of the measurement; the spectrometer was used to measure  $^{131}\text{I}$  activity of the radiation workers of the nuclear medicine departments of two grade-A tertiary hospitals in Beijing and Jinan to verify the feasibility of the method. **Results** The InSpector 1000 portable  $\gamma$  spectrometer was qualified for international intercomparison. Measurement results from the grade-A tertiary hospital in Beijing showed that the thyroid  $^{131}\text{I}$  activity of each of 10 radiation workers was below the detection limit (33.30 Bq). Measurement results from the grade-A tertiary hospital in Jinan showed that the thyroid  $^{131}\text{I}$  activities of the 4 radiation workers were 64.05 Bq, 160.77 Bq, 416.67 Bq, below the detection limit (35.18 Bq) respectively, and of 3 of the 4 subjects  $^{131}\text{I}$  was detected in the thyroid, and their corresponding thyroid accumulative organ doses were 0.70  $\mu\text{Sv}$ , 1.77  $\mu\text{Sv}$ , and 4.58  $\mu\text{Sv}$ , respectively. **Conclusion** InSpector 1000 portable  $\gamma$  spectrometer has a strong feasibility for thyroid  $^{131}\text{I}$  monitoring of radiation workers in nuclear medicine. The spectrometer has a good application prospect in the field of radiation monitoring, and can play an important role in the field of radiation protection and nuclear emergency detection.

**Keywords:** Portable  $\gamma$  Spectrometer;  $^{131}\text{I}$ ; Thyroid; Radiation Monitoring

**Corresponding author:** TUO Fei, E-mail: flytuo@163.com

$^{131}\text{I}$  是一种放射性  $\beta$  衰变核素, 被世界卫生组织 衰变时发射  $\beta$  粒子和  $\gamma$  射线<sup>[1-2]</sup>, 最主要的作用器官为国际癌症研究机构列为 1 类致癌物, 其半衰期为 8.02 d, 甲状腺<sup>[3]</sup>。该核素在核医学领域被广泛应用, 是治疗

作者简介: 彭玄 (1995—), 女, 贵州贵阳人, 在读硕士研究生, 研究方向为辐射检测与评价。E-mail: xuanpeng95@163.com

通信作者: 拓飞, E-mail: flytuo@163.com

甲状腺功能亢进、分化型甲状腺癌以及甲状腺癌转移灶的首选放射性治疗核素<sup>[4]</sup>。然而,<sup>131</sup>I 具有高挥发性,由于核医学科所使用的<sup>131</sup>I 为非密封型放射源<sup>[5]</sup>,患者体内的<sup>131</sup>I 可随着汗水、唾液、尿液和眼泪等多种体液排出<sup>[6]</sup>,且核医学工作场所是非密封性工作场所<sup>[7]</sup>,放射工作人员可能由于吸入<sup>131</sup>I 而产生内照射危害。我国国家职业卫生标准 GBZ 129—2016《职业性内照射个人监测规范》<sup>[8]</sup>中指出,应当对使用<sup>131</sup>I 进行甲状腺肿瘤治疗的职业人员进行内照射个人监测,根据具体情况确定常规监测周期,且将甲状腺测量与尿样检测作为可供选择的内照射个人监测方法。2017 年国际放射委员会(ICRP)发布了第 137 号出版物《放射性核素的职业性摄入量:第三部分》,提出在不知道确切摄入时间的情况下,应将甲状腺测量作为发现<sup>131</sup>I 暴露的首选方法,常用 NaI 探测器与锗探测器进行检测<sup>[9]</sup>。我国尚未有明确的放射工作人员甲状腺<sup>131</sup>I 内照射个人监测方法指导,本研究基于 InSpector 1000 便携式  $\gamma$  谱仪及其相应配套软件建立一种核医学科放射工作人员中甲状腺<sup>131</sup>I 体外直接测量的方法,以期放射工作人员职业防护提供技术支撑,并为标准的制订提供参考依据。

## 1 材料与方法

**1.1 仪器设备与配套软件** 本研究采用美国 Canberra®公司生产的 InSpector 1000 多功能便携式  $\gamma$  谱仪,其探测器类型为 IPROS-2 型  $2 \times 2$  英寸 NaI(Tl) 闪烁体,能在短时间内获得灵敏度较高的测量结果。系统需配置 InSpector Maintenance Utility 和 Genie 2000 谱分析软件,InSpector Maintenance Utility 是用于数据传输的软件,用数据线将计算机与探测器连接成功后计算机与探测器之间可以相互传递数据;Genie 2000 是一款常用的能谱分析软件,它包含一整套用于进一步处理  $\gamma$  能谱的高级分析算法,在常规条件下可以为用户提供准确可靠的数据,能对获取的能谱进行准确、快速的分析,识别放射性核素并确定其含量。

**1.2 谱仪刻度** 为了保证探测器系统能准确识别并测量核医学科工作人员甲状腺中的<sup>131</sup>I 核素,在监测前需要对谱仪进行刻度。本刻度实验使用的颈部模体由国际原子能机构(IAEA)提供;所使用的刻度源为<sup>131</sup>I 核素,由中国计量科学研究院提供,其刻度源编号为 I170601,质量为 20.3994 g,活度为 13 790 Bq,不确定度为 4.0%( $k=2$ ),定值时刻为 2017 年 6 月

2 日 8 时 15 分。测量刻度源,并通过相对比较法获得效率刻度因子  $CF_s$ ,其计算公式如下:

$$CF_s = \frac{n_s}{A \cdot e^{-\lambda \Delta t}} \quad (1)$$

式中  $CF_s$ : 仪器的效率刻度因子;  $n_s$ : 测量 IAEA 颈部模体 364.5 keV 全能峰净面积计数率,单位为每秒( $s^{-1}$ );  $A$ : <sup>131</sup>I 刻度源制备时刻或定值时刻( $t_0$ )的活度,单位为贝克(Bq);  $\lambda$ : 核素的衰变常数( $s^{-1}$ ),可根据  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$  求得,  $T_{1/2}$  为<sup>131</sup>I 物理半衰期(8.02 d);  $\Delta t$ : 刻度源衰变时间,即源定值时刻至测量开始时刻的时间间隔(d)。

**1.3 刻度比对** 谱仪刻度后,本实验室利用该谱仪参加了美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)发起的 2018 年甲状腺放射性碘比对计划,设备编号为 75。比对时,使用 IAEA 颈部模体与 LLNL 提供的<sup>131</sup>I 标样样品进行测量,所获得的测量结果根据美国国家标准学会(ANSI)提供的标准<sup>[10]</sup>进行比对,以比较该谱仪测量结果的准确性。

**1.4 监测方法** 应用 InSpector 1000 便携式  $\gamma$  谱仪对核医学科工作人员进行甲状腺<sup>131</sup>I 活度监测时,监测场所选择会议室等环境辐射较低的区域( $< 200$  nGy/h),并避免放射性污染,因此在监测前,需对环境进行时长为 30 s 的测量。监测时,记录医疗机构信息和被测人员个人基本信息及操作核素信息(包括最后一次操作<sup>131</sup>I 的日期及时长、防护措施),用干净的塑料袋或塑料薄膜包裹仪器探头,确保每次测量及时更换,防止仪器探头被污染。

在甲状腺体外直接测量的过程中,许多因素如探测器位置的变化、环境本底的改变、甲状腺组织覆盖物的厚度、身高和体重的变化等均会影响测量的不确定度<sup>[11]</sup>。有研究表明,放射源与探测器之间的距离变化对总体不确定度的影响最大<sup>[12]</sup>。因此,本研究测量时将探测器紧贴测量部位,旨在较短的时间内获得足够的计数。对同一被测人员,需将便携式  $\gamma$  谱仪紧贴大腿(本底测量)和甲状腺两个部位分别进行测量,测量时间为 120 s。对同一人员的大腿部和甲状腺进行测量时,也需更换包裹仪器探头的塑料袋或塑料薄膜。每次测量结束后,记录并保存谱文件。

**1.5 数据分析方法** 基于 InSpector 1000 便携式  $\gamma$  能谱仪定性和定量测量的基础,计算和分析核医学科工作人员中甲状腺<sup>131</sup>I 的活度,其放射性活度的计算公式如下:

$$A_j = \frac{(n_j - n_b)}{CF_S \cdot e^{-\lambda \Delta t}} \quad 2)$$

式中  $A_j$ : 放射性核素  $^{131}\text{I}$  的测量活度, 单位为贝克(Bq);  $n_j$ : 测量甲状腺 364.5 keV 全能峰净面积计数率, 单位为每秒( $\text{s}^{-1}$ );  $n_b$ : 测量本底 364.5 keV 全能峰净面积计数率, 单位为每秒( $\text{s}^{-1}$ );  $CF_S$ : 仪器的效率刻度因子, 由刻度实验得到;  $\lambda$ : 核素的衰变常数( $\text{s}^{-1}$ ), 可根据  $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$  求得,  $T_{1/2}$  为  $^{131}\text{I}$  物理半衰期(8.02 d);  $\Delta t$ : 从最近一次操作  $^{131}\text{I}$  完成时刻到本次甲状腺测量开始时刻之间的时间间隔(d)。

假定甲状腺摄入  $^{131}\text{I}$  的时间按最后一次操作完成时间计算, 甲状腺待积器官剂量可采用公式 3) 进行计算:

$$H_T = A_0 \cdot h_T \quad 3)$$

式中  $H_T$ : 甲状腺待积器官剂量, 单位为希沃特(Sv);  $A_0$ : 甲状腺的  $^{131}\text{I}$  摄入量, 单位为贝克(Bq);  $h_T$ : 每单位摄入量的甲状腺的辐射权重剂量  $1.1 \times 10^{-8}$ , 单位为希沃特每贝可(Sv/Bq)。

在置信度 95% 时, InSpector 1000 便携式  $\gamma$  谱仪在给定测量时间下对  $^{131}\text{I}$  的最小可探测活度 MDA, 采用公式 4) 计算<sup>[13]</sup>。

$$MDA = \frac{2.706 + 4.653 \sqrt{N_b}}{CF_S \cdot t_m} \quad 4)$$

式中 MDA: 最小可探测活度, 单位为贝克(Bq);  $N_b$ : 364.5 keV 的  $\gamma$  射线全吸收峰本底计数, 它包括探测器及其周围环境中核素引起的干扰峰计数(如果存在的话)和测量中其他高能  $\gamma$  发射体的连续谱的贡献;  $CF_S$ : 仪器的效率刻度因子, 由刻度实验得到;  $t_m$ : 测量时间。

1.6 方法应用 使用美国 Canberra® 公司生产的 InSpector 1000 便携式  $\gamma$  谱仪分别进行了 2 次应用, 于 2019 年 9 月 25 日在北京市某三甲医院核医学科进行测量, 于 2019 年 12 月 25—26 日在济南市某三甲医院核医学科进行测量。

## 2 结 果

2.1 刻度实验结果 本研究对刻度源进行了 5 次测量, 获得的平均效率刻度因子为  $4.29 \times 10^{-2} \text{ cps} \cdot \text{Bq}^{-1}$ 。

2.2 比对结果 在 LLNL 发起的 2018 年甲状腺放射性碘比对中, 本实验室谱仪所获得的测量值与 ANSI 提供的参考值之间的偏倚为 -0.03, 均方根误差为 0.04, 满足 ANSI 标准中偏倚为 -0.25~+0.50, 均方根

误差小于或等于 0.25 的条件, 比对合格, 证明使用该仪器进行测量所获得的结果可靠。

2.3 便携式  $\gamma$  谱仪在核医学科放射工作人员甲状腺  $^{131}\text{I}$  活度测量的应用结果 对北京市某三甲医院核医学科的 10 名工作人员进行测量, 测量结果显示 10 名放射工作人员的甲状腺  $^{131}\text{I}$  活度均低于最小可探测活度(33.30 Bq)。

对济南市某三甲医院核医学科的 4 名工作人员进行测量, 其中 3 个人的甲状腺内监测到了  $^{131}\text{I}$ , 另 1 人甲状腺的放射性  $^{131}\text{I}$  活度低于最小可探测活度(35.18 Bq), 测量结果见表 1。

表 1 济南市某三甲医院放射工作人员甲状腺  $^{131}\text{I}$  测量结果

Table 1 Thyroid  $^{131}\text{I}$  measurement results of radiation workers in a hospital in Jinan

被测人员编号	$A_j$ 甲状腺 $^{131}\text{I}$ 活度/Bq	甲状腺待积器官剂量/ $\mu\text{Sv}$
1	64.05	0.70
2	160.77	1.77
3	416.67	4.58
4	< 35.18	/

## 3 讨 论

核医学是研究核技术在医学上的应用及其理论的学科, 核医学科放射工作人员在职业活动中可能由于放射性核素进入体内而受到内照射。在开展甲状腺放射性  $^{131}\text{I}$  靶向治疗的核医学机构中, 若放射工作人员不慎通过呼吸道摄入  $^{131}\text{I}$ , 则有可能受到持续性的内照射。近年来, 各国关于放射工作人员内照射风险的关注度日益增加, 波兰<sup>[14]</sup>、科威特<sup>[15]</sup>、智利<sup>[16]</sup>等多国均对核医学实践中工作人员的甲状腺内照射剂量测量展开了研究, 我国核医学发展非常迅速, 但对于相关放射工作人员甲状腺内照射剂量监测的关注度仍有所欠缺。2016 有学者对我国核医学工作人员进行了内照射个人监测的必要性调查, 强调了职业人员内照射剂量监测的重要性<sup>[17]</sup>。2017 年, 王红波<sup>[18]</sup>首次建立了 NaI 便携式  $\gamma$  谱仪直接测量甲状腺中  $^{131}\text{I}$  计数的方法, 为本研究提供了思路, 其刻度使用的模体为美国 Radiology Support Devices®(RSD)有限公司生产的裂变产物模体, 它包括头部、颈部、完整的躯干和在臀部有关节的残余腿根部, 但刻度过程中需要往空壳甲状腺等效模体中手动加注  $^{131}\text{I}$  标准源溶液, 存在一定的实验风险。本研究改进了刻度试验的方法, 选择 IAEA 提供的通用颈部模体进行刻度, 所用的刻度



源为中国计量科学研究院提供的密封型刻度源,并于文献[18]的基础上,提出了使用塑料袋或塑料薄膜防止探头污染的措施,推导出适合于本方案的放射性活度计算公式,所选择的 $\gamma$ 谱仪参与了 LLNL 发起的国际甲状腺放射性碘比对计划,测量结果的可靠性有保证。旨在将 InSpector 1000 便携式 $\gamma$ 谱仪应用于放射工作人员的甲状腺 $^{131}\text{I}$ 内照射剂量监测中,以期掌握其职业内照射现状,保护他们的健康权益。

《职业性内照射个人监测规范》[8]中规定对接受内照射个人监测的人员,应根据具体情况确定常规监测的周期。但我国放射工作人员甲状腺 $^{131}\text{I}$ 内照射个人监测工作尚未在大范围内展开,因此本研究建立的方法同样适用于放射工作人员甲状腺 $^{131}\text{I}$ 单次内照射个人测量,亦可为应急情况发生时开展监测工作提供方法支撑。

在方法应用方面,分别对北京市与济南市的 2 家三甲医院核医学科工作人员进行了测量,前者的监测中,所有被测人员的甲状腺 $^{131}\text{I}$ 活度均低于最小可探测活度,解除了相关工作人员对于 $^{131}\text{I}$ 所致内照射污染的担忧;后者的监测中,4 名被测对象中有 3 个人的甲状腺内监测到了 $^{131}\text{I}$ ,其职业类型分别为护士、医师、保洁人员,甲状腺 $^{131}\text{I}$ 活度分别为 64.05 Bq、160.77 Bq、416.67 Bq,对应的甲状腺待积器官剂量分别为 0.70  $\mu\text{Sv}$ 、1.77  $\mu\text{Sv}$ 、4.58  $\mu\text{Sv}$ ,提示该核医学科可能存在一定的内照射污染,推测可能是由于给药间或高活室内放射性废气的门窗泄露造成,但仍需采取进一步的调查研究以寻找污染源,采取相应的防护措施以保护工作人员健康。

实际测量中显示, InSpector 1000 便携式 $\gamma$ 谱仪操作顺利,被测人员的依从性好,将该谱仪应用于常规监测的可行性强。所建立的便携式 $\gamma$ 谱仪测量方法能够快速、便捷、准确地检出人体内的放射性 $^{131}\text{I}$ 核素,为今后对放射工作人员的日常监测以及核辐射事故中应急人员和公众的体内放射性 $^{131}\text{I}$ 测量提供了新的思路,为国内医院辐射监测工作提供导引,值得进一步推广实施。但本研究仍存在不足之处,在方法应用部分,所测量的人员数量较少,进一步的研究中应扩大监测范围,获取更多有效数据。

**利益冲突声明** 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** 彭玄:数据分析和文章撰写;张建峰:方案设计和指导;拓飞:文章修改和校对;杨宝路:收集数据和

协助实验操作

## 参考文献

- [1] Misdaq MA, Harrass H, Saikouk H, et al. Dose to medical personnel[J]. *Health Phys*, 2020, 118 (2): 129-135. DOI: [10.1097/hp.0000000000001140](https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001140).
- [2] 彭建亮.  $^{131}\text{I}$ 放射性药物生产工作人员剂量估算与评价[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28(6): 662-664. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.017](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.017).
- [3] Peng JL. Dose estimation and evaluation for  $^{131}\text{I}$  radioactive pharmaceuticals production workers[J]. *Chin J Radiol Heal*, 2019, 28(6): 662-664. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.017](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714x.2019.06.017).
- [4] 朱承谟. 核医学影像与实践[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2001.
- [5] Zhu CM. Nuclear Medicine Imaging and Practice[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House, 2001.
- [6] 刘宝华, 孔令丰, 王美霞.  $^{131}\text{I}$ 在核医学应用中的辐射防护及评价[J]. *中国辐射卫生*, 2008, 17 (2): 182-183. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2008.02.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2008.02.028).
- [7] Liu BH, Kong LF, Wang MX. Radiation protection and assessment of  $^{131}\text{I}$  application in nuclear medicine[J]. *Chin J Radiol Heal*, 2008, 17 (2): 182-183. DOI: [10.3969/j.issn.1004-714X.2008.02.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-714X.2008.02.028).
- [8] Martínez J, Baciú T, Artigues M, et al. Nuclear medicine: workplace monitoring and internal occupational exposure during a ventilation/perfusion single-photon emission tomography[J]. *Radiat Environ Biophys*, 2019, 58 (3): 407-415. DOI: [10.1007/s00411-019-00798-x](https://doi.org/10.1007/s00411-019-00798-x).
- [9] Alkhorayef M, Sulieman A, Mohamed-Ahmed M, et al. Staff and ambient radiation dose resulting from therapeutic nuclear medicine procedures[J]. *Appl Radiat Isot*, 2018, 141: 270-274. DOI: [10.1016/j.apradiso.2018.07.014](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.07.014).
- [10] 江丽红, 李鹏, 李小鹏, 等. 河北省部分核医学工作场所的放射防护现状调查与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29 (2): 157-161, 165. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.02.015](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.02.015).
- [11] Jiang LH, Li P, Li XP, et al. Investigation and analysis on current situation of radiation protection in some nuclear medicine in Hebei Province[J]. *Chin J Radiol Heal*, 2020, 29 (2): 157-161, 165. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2020.02.015](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2020.02.015).
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ 129—2016职业性内照射个人监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [13] National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GBZ 129—2016 Specifications for individual monitoring of occupational internal exposure[S]. Beijing, Standards Press of China, 2016.

(下转第 43 页)

- [11] Alvarez P, Kry SF, Stingo F, et al. TLD and OSLD dosimetry systems for remote audits of radiotherapy external beam calibration[J]. *Radiat Meas*, 2017, 106: 412-415. DOI: [10.1016/j.radmeas.2017.01.005](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.01.005).
- [12] Lye J, Dunn L, Kenny J, et al. Remote auditing of radiotherapy facilities using optically stimulated luminescence dosimeters[J]. *Med Phys*, 2014, 41 ( 3 ) : 032102. DOI: [10.1118/1.4865786](https://doi.org/10.1118/1.4865786).
- [13] IAEA HUMAN HEALTH REPORTS No. 8: Development of Procedures for In Vivo Dosimetry in Radiotherapy[S]. 2013.
- [14] Kerns JR, Kry SF, Sahoo N, et al. Angular dependence of the nanoDot OSL dosimeter[J]. *Med Phys*, 2011, 38 ( 7 ) : 3955-3962. DOI: [10.1118/1.3596533](https://doi.org/10.1118/1.3596533).
- [15] Lehmann J, Dunn L, Lye JE, et al. Angular dependence of the response of the nanoDot OSLD system for measurements at depth in clinical megavoltage beams[J]. *Med Phys*, 2014, 41 ( 6 ) : 061712. DOI: [10.1118/1.4875698](https://doi.org/10.1118/1.4875698).
- [16] McGrath A. Relative dosimetry measurements in kilovoltage X-rays with OSLDs[J]. *Phys Eng Sci Med*, 2020, 43 ( 1 ) : 289-295. DOI: [10.1007/s13246-020-00845-8](https://doi.org/10.1007/s13246-020-00845-8).
- [17] Musa Y, Hashim S, Ghoshal S. K. et al General radiographic attributes of optically stimulated luminescence dosimeters: A basic insight[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2018: 1-6.

收稿日期:2020-07-18

## (上接第 37 页)

- [9] International Commission on Radiological Protection. Publication 137 Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3[S]. 2017.
- [10] American National Standards Institute and Health Physics Society. Performance criteria for radiobioassay[S]. ANSI/HPS N13.30-2011, 2011.
- [11] Dantas BM, Lima FF, Dantas AL, et al. Determination of uncertainties associated to the *in vivo* measurement of iodine-131 in the thyroid[J]. *Appl Radiat Isot*, 2016, 113: 1-4. DOI: [10.1016/j.apradiso.2016.04.007](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.04.007).
- [12] Yunoki A. Uncertainty of measurement in the response test of a thyroid monitor[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2019, 184 ( 3/4 ) : 531-534. DOI: [10.1093/rpd/ncz117](https://doi.org/10.1093/rpd/ncz117).
- [13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. WS/T 584—2017 人体放射性核素全身计数测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. WS/T 584—2017 Methods for measuring radionuclides in the human body with whole body counts[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [14] Brudecki K, Kowalska A, Zagrodzki P, et al. Measurement of <sup>131</sup>I activity in thyroid of nuclear medical staff and internal dose assessment in a Polish nuclear medical hospital[J]. *Radiat Environ Biophys*, 2017, 56 ( 1 ) : 19-26. DOI: [10.1007/s00411-016-0674-1](https://doi.org/10.1007/s00411-016-0674-1).
- [15] Alnaaimi M, Alkhorayef M, Omar M, et al. Occupational radiation exposure in nuclear medicine department in Kuwait[J]. *Radiat Phys Chem*, 2017, 140: 233-236. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2017.02.048](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.02.048).
- [16] Díaz-Londoño G, García M, Astudillo R, et al. Development and implementation of tools for self-monitoring of staff exposed to <sup>131</sup>I in nuclear medicine centres of Chile[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2017, 173 ( 4 ) : 302-307. DOI: [10.1093/rpd/ncv554](https://doi.org/10.1093/rpd/ncv554).
- [17] 王红波, 张钦富, 侯长松, 等. 医院核医学科工作人员内照射监测的必要性研究[J]. *中国工业医学杂志*, 2016, 29 ( 5 ) : 333-335, 355. DOI: [10.13631/j.cnki.zggyyx.2016.05.003](https://doi.org/10.13631/j.cnki.zggyyx.2016.05.003).
- Wang HB, Zhang QF, Hou CS, et al. Study on necessity of monitoring internal radiation in nuclear medicine staffs of hospital[J]. *Chin J Ind Med*, 2016, 29 ( 5 ) : 333-335, 355. DOI: [10.13631/j.cnki.zggyyx.2016.05.003](https://doi.org/10.13631/j.cnki.zggyyx.2016.05.003).
- [18] 王红波. 核医学科工作人员职业性内照射研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2017.
- Wang HB. Study on occupational internal exposure of nuclear medicine workers[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2017.

收稿日期:2020-08-17