

热释光剂量计在核电厂环境监测中的应用

张伟珠, 林淑倩, 孔杜娟, 廖建华, 黄耿诚, 陈爱

广东省环境辐射监测中心, 广东 广州 510300

摘要: **目的** 研究岭澳核电站运营后大亚湾核电基地 6 台机组气态流出物排放对周围陆地环境辐射水平的影响。**方法** 利用热释光剂量计(TLD)监测广东大亚湾核电基地外围环境辐射水平, 在大亚湾核电周围陆地环境布设 25 个 TLD 监测点, 每 3 个月左右回收热释光剂量计并测量, 长期观测核电周围陆地环境辐射水平变化。**结果** 2011—2020 年大亚湾核电基地外围环境用热释光剂量计测量得到的 γ 辐射剂量率年均值范围为 76.7~207.1 nGy/h、均值为 (123.3 ± 5.7) nGy/h, 年均值变化相对偏差范围为 2%~12%, TLD 监测结果、剂量率瞬时测量结果与 20 世纪国家环保总局组织的调查结果、核电运营前的本底水平一致。**结论** 不同 TLD 监测点环境天然辐射水平差异较大, 核电站周围 50 km 范围内的总体环境 γ 辐射水平没有变化, 核电运行气态流出物的释放未对外围环境辐射水平产生累积影响。

关键词: 辐射监测; 热释光; 剂量计; 大亚湾核电

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2022)03-0296-05

Application of thermoluminescence dosimeter in environmental monitoring of nuclear power plant

ZHANG Weizhu, LIN Shuqian, KONG Dujuan, LIAO Jianhua, HUANG Gengcheng, CHEN Ai

Guangdong Environmental Radiation Monitoring Center, Guangzhou 510300 China

Abstract: **Objective** To investigate the effect of gaseous effluent from the six generator sets on the radiation level of the surrounding terrestrial environment in Daya Bay Nuclear Power Base after the operation of Ling'ao Nuclear Power plant. **Methods** The radiation level in the peripheral environment of the Base was monitored using the thermoluminescence dosimeter (TLD). Twenty-five monitoring sites were set around the Base to investigate the variation of radiation level over a long period of time by collecting the TLDs every three months. **Results** From 2011 to 2020, the annual γ dose rate of the 25 sites ranged from 76.7 to 207.1 nGy/h, with an average value of (123.3 ± 5.7) nGy/h and a relative deviation of 2%-12%. The TLD monitoring and instantaneous measuring results of γ dose rate were consistent with the survey of the State Environmental Protection Administration in the 20th century and the baseline level prior to the operation of the nuclear power plant. **Conclusion** There are great differences in natural environmental radiation level across the TLD monitoring sites. The overall environmental γ radiation level within 50 km of the nuclear power base remains unchanged. The emission of gaseous effluent from the operation of the nuclear power plant does not have a cumulative impact on the radiation level of surrounding environment.

Keywords: Radiation monitoring; Thermoluminescence; Dosimeter; Daya Bay Nuclear Power

大亚湾核电基地位于大亚湾西海岸、大鹏镇辖区大鹏半岛东南侧, 总占地面积约 10 平方公里, 内有大亚湾核电厂和岭澳核电厂一期、岭澳核电厂二期, 目前大亚湾基地有 6 台百万千瓦级的机组在运行^[1], 年上网电量超过 450 亿千瓦时^[2], 由于毗邻香港、深圳等发达大城市, 它的运行对周围环境的影响尤其引人关注。以往文献报道的主要是液态流出物排放对海洋环境的影响^[3-4], 有关核电运营过程中对陆地环境

的影响报道不多, 也未发现核电周围环境辐射水平有明显变化^[5]。为保护环境、保障公众健康, 广东省环境辐射监测中心受生态环境部和广东省生态环境厅委托对大亚湾核电基地开展监督性监测, 制定了全面的监测方案^[6]。核电外围环境辐射水平的变化, 除考虑环境自然变化外, 还需观测核电运营过程中反应堆人工核素释放的影响^[7], 热释光剂量计(TLD)是监测环境辐射水平变化的重要手段。本文研究 2010 年岭

澳核电站全面运营后周围环境辐射水平的变化, 统计分析 2011—2020 年广东大亚湾核电基地周围 TLD 监测数据并介绍 TLD 监测在核电站外围环境监测中的应用。

1 材料与方法

1.1 仪器设备 LiF(Mg、Cu、P)玻璃管探测器(中国辐射防护研究院), HW-II 型精密退火炉(核工业部第七研究所), RGD-3B 型热释光测量仪(北京防化研究院), 6150AD-b 便携式 γ 辐射剂量率仪(Automation und Messtechnik GmbH), 自动站 RS-S131-200 高气压电离室(GE Energy Reuter-Stokes, Inc)。

1.2 点位布设 以反应堆为中心, 半径 50 km 内, 近密远疏, 共布设 25 个监测点, 其中 1 km 内布设 12 个监测点, 1~10 km 范围布设 5 个监测点, 11~50 km 范围布设 8 个监测点。点位布放一般在地势开阔的地方, 距离建筑物至少 10 m, 离地约 1 m, 布放周期约为 3 个月, 回收 TLD 时同时布放下一周期 TLD, 并用便携式 γ 辐射剂量率仪对测点进行瞬时 γ 剂量率测量。

1.3 测量方法 TLD 测量参照《个人和环境监测用热释光剂量测量系统》(GB/T 10264—2014)执行。热释光测量仪测量参数设置为: 剂量量程“2”, 升温速度“15℃/s”, 恒温时间“18 s”, 恒温温度“270℃”, 仪器测量结果经刻度系数修正后除以总布放时间即为 TLD 测量平均剂量率。便携式 γ 辐射剂量率仪在同点位等高测量读数经刻度系数修正后即为该点位瞬时测量剂量率。

1.4 质量保证 由于一般环境的辐射剂量率较低, 因此质量保证是 TLD 测量环境累积剂量工作中很重要的环节, 它关系到数据的准确性和可靠性^[8]。我中心 TLD 质控可以分成 2 个部分: 内部质量控制及外部质量保证。

1.4.1 TLD 累积剂量测量的内部质量控制措施 1)委托中国科学计量研究院对热释光测量系统每年进行检定, 剂量检验及刻度系统的线性均达到标准要求; 6150AD-b 便携式 γ 辐射剂量率仪委托广东省辐射剂量计量检定站检定合格; 自动站 RS-S131-200 高气压电离室定期(每季度)与可移动 RSS-131 高压电离室(每年委托广东省辐射剂量计量检定站检定合格)比对校准, 比对结果相对偏差在 5% 以内。2)做好期间控制: 每月定期测量相同辐照剂量的 TL 元件, 绘制测定值质控图; 元件更换时, 进行变异系数和非线性

响应试验; 每半年测量指定剂量的 TL 元件, 测定结果符合规定要求。

1.4.2 TLD 累积剂量测量的外部质量控制措施 1)生态环境部辐射环境监测技术中心不定期组织辐射环境监测项目考核, 其中 TLD 监测项目考核结果与参考值完全吻合。2)参加中国辐射防护研究院组织的广东核电站/岭澳核电站事故场外应急事宜粤港合作辐射测量 TLD 比对, 比对结果与参考值的相对偏差均小于 10%。3)每年与大亚湾核电基地环境实验室在核电站内同时布放 7 个点位进行测量比对, 两家测量结果比值范围为 0.94~1.12, 数据吻合度较好。

2 结果

2.1 监测结果 2011—2020 年大亚湾核电外围环境 25 个监测点位 TLD 监测结果见表 1。25 个监测点 10 年监测均值 TLD 与 γ 剂量率仪测量结果比较见图 1。

大坑水库监测点 2014—2018 年 TLD 累积测量与自动监测站连续测量结果比较见表 2。

在 25 个监测点中挑选 9 个位置相对固定且每个季度都不缺失数据的点位, 取 2011—2015 年各季度 TLD 测量结果进行比较见图 2。

2.2 论述 (1)由表 1 可见: ①2011—2020 年大亚湾核电基地外围 TLD 测量 25 个监测点剂量率水平岭澳北最高(靠近厂区重水池), 年均值为 (207.1 ± 8.7) nGy/h, 南澳、坪山测点次之, 分别为 (170.6 ± 8.6) 、 (149.6 ± 8.7) nGy/h, 葵涌测点最低, 为 (76.7 ± 8.9) nGy/h。25 个测点年均值范围为 76.7~207.1 nGy/h, 均值为 (123.3 ± 5.7) nGy/h, 剔除岭澳北点均值为 (119.8 ± 5.6) nGy/h。TLD 累积剂量监测结果与上世纪末国家环境保护总局组织的全国调查结果一致: 广东省天然贯穿辐射剂量率网格测点室外均值为 (112.7 ± 27.4) nGy/h, 深圳市室外网格测点均值为 (115.4 ± 0.1) nGy/h^[10]。②10 年 25 个测点的年均值变化相对偏差范围为 2%~12%, 平均为 5%。其中鹏城和葵涌测点相对偏差最大为 12%, 原因是测点周围环境发生过改变, 说明跟踪评价某地辐射水平的长期变化趋势, 测点位置的重复性非常关键。③2011—2020 年监测结果与大亚湾核电、岭澳核电运行前(大亚湾核电、岭澳核电一期分别于 1994、2003 年装料发电)大亚湾环境放射性本底调查值(核电站 50 km 范围内)125.3 nGy/h 一致^[9], 说明核电周围辐射环境水平在 2011—2020 年无明显变化, 即岭澳核

表 1 2011—2020 年大亚湾核电基地外围环境 TLD 累积剂量测量统计表

Table 1 TLD cumulative dose of radiation in the peripheral environment of Daya Bay Nuclear Power Base, 2011—2020

| 点位名称 | 监测数据/(nGy/h) | | | | | | | | | | 均值 | 标准差 | 相对偏差(%) |
|----------------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|---------|
| | 2011年 | 2012年 | 2013年 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | 2020年 | | | |
| 深圳水库 | 95 | 90 | 83 | 80 | 90 | 80 | 79 | 80 | 80 | 78 | 83.5 | 5.9 | 7 |
| 北龙北 | 113 | 120 | 120 | 115 | 120 | 115 | 113 | 113 | 117 | 118 | 116.4 | 3.0 | 3 |
| 北龙南 | 136 | 141 | 142 | 141 | 146 | 140 | 140 | 138 | 141 | 140 | 140.5 | 2.6 | 2 |
| 岭澳气象站 | 126 | 130 | 129 | 126 | 128 | 119 | 119 | 122 | 125 | 129 | 125.3 | 4.1 | 3 |
| 岭澳北 | 215 | 213 | 222 | 208 | 204 | 200 | 198 | 193 | 211 | 207 | 207.1 | 8.7 | 4 |
| 岭澳西 | 140 | 140 | 140 | 144 | 148 | 136 | 138 | 134 | 137 | 138 | 139.5 | 4.0 | 3 |
| 参观平台 | 134 | 130 | 133 | 140 | 144 | 136 | 138 | 135 | 143 | 127 | 136 | 5.4 | 4 |
| 大坑水库 | 132 | 133 | 132 | 132 | 136 | 124 | 129 | 124 | 125 | 126 | 129.3 | 4.3 | 3 |
| 核电水库 | 113 | 113 | 114 | 112 | 115 | 98 | 105 | 107 | 111 | 120 | 110.8 | 6.1 | 6 |
| 核电北 | 135 | 132 | 134 | 135 | 138 | 129 | 134 | 134 | 137 | 142 | 135 | 3.5 | 3 |
| 核电西 | 127 | 128 | 125 | 132 | 130 | 122 | 124 | 122 | 129 | 129 | 126.8 | 3.4 | 3 |
| 核电东南 | 96 | 94 | 96 | 99 | 100 | 97 | 97 | 91 | 100 | 101 | 97.1 | 3.1 | 3 |
| 核电南 | 122 | 119 | 118 | 119 | 121 | 110 | 117 | 112 | 113 | 110 | 116.1 | 4.5 | 4 |
| 鹏城 | 129 | 132 | 145 | 145 | 146 | 134 | 112 | 110 | 111 | 112 | 127.6 | 15.2 | 12 |
| 大鹏 | 137 | 133 | 131 | 134 | 133 | 115 | 116 | 114 | 123 | 129 | 126.5 | 8.7 | 7 |
| 东山 | 109 | 104 | 106 | 106 | 108 | 98 | 108 | 111 | 113 | 116 | 107.9 | 5.0 | 5 |
| 高岭村 | 124 | 125 | 127 | 128 | 123 | 116 | 118 | 115 | 116 | 120 | 121.2 | 4.8 | 4 |
| 南澳 | 171 | 178 | 179 | 181 | 180 | 163 | 171 | 162 | 158 | 163 | 170.6 | 8.6 | 5 |
| 葵涌 | 95 | 84 | 67 | 66 | 80 | 71 | 73 | 71 | 79 | 81 | 76.7 | 8.9 | 12 |
| 坪山 | 140 | 132 | 156 | 154 | 154 | 146 | 147 | 149 | 157 | 161 | 149.6 | 8.7 | 6 |
| 坝岗 | 112 | 120 | 119 | 118 | 121 | 114 | 118 | 115 | 113 | 113 | 116.3 | 3.3 | 3 |
| 溪涌 | 89 | 89 | 88 | 90 | 92 | 85 | 87 | 83 | 84 | 85 | 87.2 | 2.9 | 3 |
| 沙头角 | 111 | 110 | 108 | 108 | 106 | 99 | 102 | 101 | 104 | 108 | 105.7 | 4.0 | 4 |
| 盐田 | 129 | 127 | 121 | 112 | 112 | 103 | 106 | 106 | 110 | 107 | 113.3 | 9.2 | 8 |
| 澳头 | 113 | 113 | 114 | 118 | 118 | 108 | 114 | 115 | 118 | 123 | 115.4 | 4.1 | 4 |
| 均值 | 126 | 125 | 126 | 126 | 128 | 118 | 120 | 118 | 122 | 123 | 123.3 | 27.2 | 5 |
| 本底调查 ^[9] (1991—1992年) | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 125.3 | 34.6 | - |

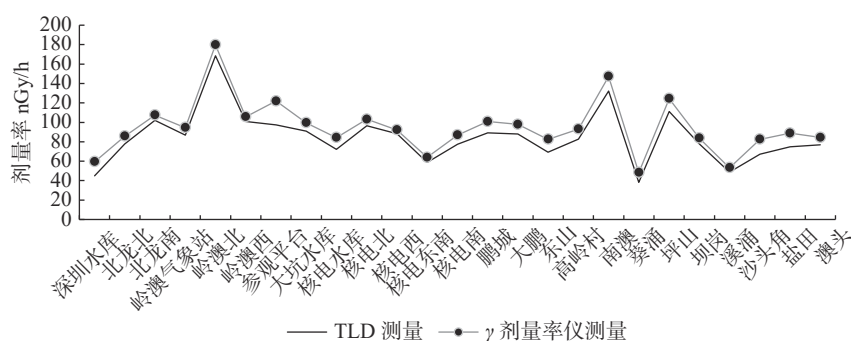
图 1 2011—2020 年 TLD 累积测量与瞬时测量 γ 剂量率比较 (已扣除宇宙射线响应)Figure 1 Comparison of TLD cumulative dose with instantaneous γ dose rate, 2011—2020

表 2 2014—2018 年 TLD 累积测量与自动监测站连续测量结果比较

Table 2 Comparison of TLD cumulative dose with auto-continuous monitoring, 2014—2018

| 年份 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 均值 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 累积监测A (nGy/h) | 94 | 98 | 91 | 91 | 87 | 92 |
| 自动监测B (nGy/h) | 99 | 100 | 101 | 105 | 102 | 101 |
| 比值A/B | 0.95 | 0.98 | 0.90 | 0.87 | 0.86 | 0.91 |

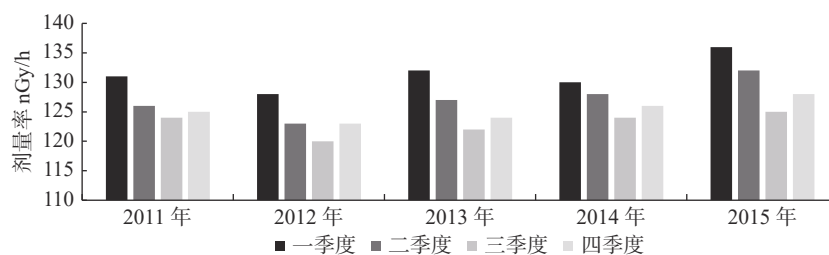


图 2 2011—2015 年各季度 TLD 测量结果比较

Figure 2 Comparison of quarterly TLD monitoring results, 2011—2015

电相继投产释放的人工核素未对周围环境产生可观测的影响。

(2)由图 1 可见, TLD 累积剂量测量与 γ 剂量率仪瞬时测量 2 种不同测量方法, 分别扣除宇宙射线响应后所得结果较一致, 偏差范围为 4%~24%, 说明 2 种方法都比较稳定, 在对大亚湾核电基地环境辐射水平监测中能起到相互对比的作用。

(3)由表 2 可见, 大坑水库测点在 2014—2018 年连续 5 年中, TLD 累积测量与自动站连续测量所得结果相比, 比值范围为 0.86~0.98, 均值为 0.91, 说明相同点位辐射环境水平在 2 种不同方法测量下, 除去系统误差外, 所得结果波动较小, 吻合度高, 测量数据是稳定可靠的。

(4)由图 2 可见, 9 个监测点的剂量率均值变化表现出冬(一季度, 12 月~次年 2 月)春(二季度, 3~5 月)较高, 夏季(三季度, 5~8 月)较低的现象, 普遍认为环境 γ 辐射的变化与季节降雨量和土壤含水率变化等相关^[11]。广东的年降雨量大, 根据大亚湾核电基地内的气象资料, 2011—2020 年均降雨量范围为 1 410~3 295 mm, 降雨主要集中在 4~9 月, 可占全年降雨总量的 75% 以上, 10 月至次年 3 月干旱少雨, 漂浮于空气中的氡子体对环境空气辐射水平的贡献较大, 对核电周围的 γ 辐射连续监测的数据分析, 结果表明下雨瞬间数分钟导致监测点的剂量率上升, 最高可达本底水平的 1 倍, 随即下降略低于该测点的年均值。引起此种变化的主要原因也是因为氡子体在降雨初期被雨水载带沉积导致上升, 而后则是雨水屏蔽带来的负影响导致辐射水平下降^[12]。

3 讨论

TLD 因其廉价、稳定、易操作等特点, 在辐射剂量学中应用广泛^[13-14], 也是辐射环境监测的主要手段之一^[15]。核电外围辐射环境监测数据需要长期观测气态流出物的排放才能知道是否产生累积影响, 而不同测点之间的辐射水平差异较大, 因此监测点位需要

相对固定, 不可随意调整变更, 同时也需要在做监测方案时考虑测点四周环境可长期维持不变的可能性, 尽量降低布点位置变动或环境人为骚扰引入的变化, 以便准确观测核电放射性源项释放可能产生的影响。

正常情况下核电气态流出物释放的人工核素主要为 ^3H 、 ^{14}C 等低能 β 衰变核素, ^{131}I 等卤素和 ^{85}Kr 、 ^{131}Xe 惰性气体释放量占比非常小, 异常排放受气象和地形等条件制约, 需要在合适的时间、地点方有可能测到。核电外围环境辐射水平监测通常采用 TLD、 γ 剂量率瞬时测量、 γ 剂量率连续自动监测等方法。 γ 剂量率瞬时测量只反应测量时刻的辐射水平, 受降雨、空气中氡及其子体浓度的影响不同观测时间的数据波动较大, 瞬时剂量率的测量需要考虑仪器性能和对宇宙射线响应的差异, 同一监测点不同时间的测量数据波动范围可能存在较大差异, 最大可达 30% 以上^[5]。核电外围布设的连续监测系统建设投入大, 需要预设机房且有供电、通讯等, 运营成本较高, 监测点受场地和投入制约不可能太多, 测点范围小, 同样受降雨和氡及其子体的影响^[12, 16], 优点是可实时监测该点的辐射水平变化并预警。TLD 累积剂量监测更为合理、便捷, 成本相对也较低, 只要在核电周围合理布设监测点, 可长期观测核电气态流出物排放的累积影响, 其灵敏程度相对瞬时剂量率要高, 缺点是不能实时获取环境辐射水平的变化, 即使事后观测到异常, 也需要其它资料或技术手段佐证异常的时间和原因, 相对而言同点 TLD 的测量数据各年间的差异在 10% 以内, 环境 TLD 的合成扩展不确定度约为 3% ($K=1$)^[17]。

同一观测点即使环境状况没有变化, 也可能受季节、降雨等自然环境气候变化的影响^[12], 降雨可显著影响土壤中的含水率, 而土壤中的水一方面可屏蔽部分地表辐射, 另一方面可影响土壤中氡的析出, 最终导致 TLD 测量结果随降雨量增加而降低, 也是造成 TLD 测值与该点瞬时 γ 剂量率测值差异的主要

因素^[16, 18]。

从大亚湾外围环境 TLD 的监测数据来看, 岭澳核电二期全面运营后周围环境辐射水平未观测到变化, 说明一址多堆的大亚湾核电基地气态流出物排放未对周围环境产生累积影响。

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 张伟珠负责现场测量、实验过程、数据整理、论文撰写; 林淑倩、孔杜娟负责现场测量、实验过程、数据整理; 廖建华、黄耿诚、陈爱负责现场测量

参考文献

- [1] 梁贵渊, 邓飞, 陈万良, 等. 大亚湾核电基地周围海洋沉积物的放射性水平[J]. 核安全, 2019, 18 (5): 33-37. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2019.05.006.
Liang GY, Deng F, Chen WL, et al. The radioactivity of marine sediments nearby Daya Bay Nuclear Power Base[J]. Nucl Saf, 2019, 18 (5): 33-37. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2019.05.006.
- [2] 大亚湾核电运营管理有限公司. 打造世界核电运营的中国方案——大亚湾核电运营管理有限公司[J]. 核安全, 2020, 19(5): 85-87.
Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd. (DNMC). Creating a Chinese solution for the world's nuclear power operations[J]. Nuclear Safety, 2020, 19(5):85-87.
- [3] 邓飞, 林清, 王家玥, 等. 大亚湾核电基地氚的排放及其环境影响[J]. 环境化学, 2016, 35 (5): 956-963. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.05.2015112406.
Deng F, Lin Q, Wang JY, et al. Tritium discharged by Daya Bay Nuclear Power plant and its environmental impact[J]. Environ Chem, 2016, 35 (5): 956-963. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.05.2015112406.
- [4] 林清, 邓飞, 陈志东, 等. 大亚湾核电站周围海域海洋环境介质中^{110m}Ag含量[J]. 辐射防护通讯, 2002, 23 (3): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2002.03.010.
Lin Q, Deng F, Chen ZD, et al. Concentrations of nuclide ^{110m}Ag in marine samples around Daya Bay nuclear power station[J]. Radiat Protect Bull, 2002, 23 (3): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2002.03.010.
- [5] 黄乃明, 周睿东, 陈志东, 等. 大亚湾地区三次环境γ辐射剂量率调查测量结果比较分析[J]. 辐射防护通讯, 2003, 23 (4): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2003.04.006.
Huang NM, Zhou RD, Chen ZD, et al. Comparison and analysis of results of γ radiation level investigation around Daya Bay[J]. Radiat Protect Bull, 2003, 23 (4): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2003.04.006.
- [6] 黄乃明, 陈志东, 宋海青, 等. 大亚湾和岭澳核电站外围辐射环境监督性监测[J]. 辐射防护, 2004, 24 (3/4): 191-205. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2004.03.007.
Huang NM, Chen ZD, Song HQ, et al. Supervision monitoring for radiation environment around Daya Bay and Ling Ao nuclear power stations[J]. Radiat Protect, 2004, 24 (3/4): 191-205. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2004.03.007.
- [7] 王建华, 邓文, 王琪, 等. 压水堆核电厂气态流出物环境累积效应研究[J]. 原子能科学技术, 2020, 54 (9): 1685-1690. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0724.
Wang JH, Deng W, Wang Q, et al. Environment accumulation effect from gaseous effluent of pressurized water reactor plant[J]. Atom Energy Sci Technol, 2020, 54 (9): 1685-1690. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0724.
- [8] 杨莉, 王丽姣, 邵明刚, 等. 用于环境辐射水平监测的热释光测量系统的质量控制[J]. 中国辐射卫生, 2021, 30 (4): 457-462. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.04.014.
Yang L, Wang LJ, Shao MG, et al. Quality control measures of thermoluminescent dosimetry system used in environmental radiation monitoring[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30 (4): 457-462. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.04.014.
- [9] 广东大亚湾核电站环境放射性本底调查总结报告(1990.5-1993.8). 内部资料.
Summary Report on Environmental radioactivity background investigation of Daya Bay Nuclear Power Plant in Guangdong province (1990.5-1993.8). Internal data.
- [10] 谈根洪, 李翠琴, 李明, 等. 广东省环境天然贯穿辐射水平调查研究[J]. 辐射防护, 1991, 11 (1): 47-57.
Tan GH, Li CQ, Li M, et al. Investigation of environmental natural penetrating radiation level in Guangdong province[J]. Radiat Protect, 1991, 11 (1): 47-57.
- [11] 万玉松, 李世珣, 杨琳, 等. 广东大亚湾核电站环境辐射热释光累积剂量监测研究[J]. 核电子学与探测技术, 1999, 19 (2): 118-122. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.1999.02.009.
Wan YS, Li SL, Yang L, et al. Monitoring and studies of environmental cumulative dose of Guangdong Daya Bay nuclear-power station by thermoluminescent dosimetry[J]. Nucl Electron Detect Technol, 1999, 19 (2): 118-122. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.1999.02.009.
- [12] 林武辉, 王诗玥, 黄亚萍, 等. 大气中γ辐射空气吸收剂量率的波动机制[J]. 中国环境科学, 2022, 42 (3): 1097-1103. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0043.
Lin WH, Wang SY, Huang YP, et al. Mechanism of the Variable γ Radiation Air Absorbed Dose Rate In the Atmosphere[J]. China Environmental Science, 2022, 42 (3): 1097-1103. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0043.

(下转第 310 页)

Radiat Prot Bull, 2017, 37 (1) : 8-13.

- [6] 杜勤, 顾先宝, 陈志, 等. 合肥市 TSP 和 PM_{2.5} 中⁷Be 和²¹⁰Pb 浓度及变化研究[J]. 中国辐射卫生, 2020, 29 (5) : 510-514. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.017.

Du Q, Gu XB, Chen Z, et al. Study on concentrations and changes of ⁷Be and ²¹⁰Pb in TSP and PM_{2.5} in Hefei[J]. Chin J Radiol Health, 2020, 29 (5) : 510-514. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.017.

- [7] 刘宇航, 黄英, 古川, 等. 绵阳地区近地面气溶胶中⁷Be和²¹⁰Pb分布特征及其对O₃的示踪[J]. 辐射防护, 2020, 40 (6) : 587-592. Liu YH, Huang Y, Gu C, et al. Distribution characteristics of ⁷Be and ²¹⁰Pb in near surface aerosols in Mianyang area and their tracing of O₃[J]. Radiat Prot, 2020, 40 (6) : 587-592.
- [8] 冯江平, 刘焱, 丁敏霞, 等. 深圳市大气沉降灰中放射性核素^γ能谱分析研究[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (1) : 66-68. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.01.018.

Feng JP, Liu Y, Ding MX, et al. Study on radionuclides in air fallout analyzed by gamma spectrometry in Shenzhen[J]. Chin J Radiol Health, 2019, 28 (1) : 66-68. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.01.018.

- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 16140—2018 水中放射性核素的^γ能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 16140—2018 Determination of radionuclides in water by gamma spectrometry [S]. Beijing: China Standard press, 2018.

- [10] Browne E, Firestone RB, Shirley VS. Table of radioactive isotopes[M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.

- [11] 刘原中, 唐鄂生, 李建平, 等. 高能质子加速器治疗系统应用中的环境安全问题[J]. 原子能科学技术, 2004, 38 (S1) : 192-196. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2004.z1.046.

Liu YZ, Tang ES, Li JP, al. The problems of environmental safety for application of high energy proton accelerator therapy system[J]. Atomic Energy Sci Technol, 2004, 38 (S1) : 192-196. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6931.2004.z1.046.

- [12] 田永顺, 胡志良, 童剑飞, 等. 基于3.5 MeV射频四极质子加速器硼中子俘获治疗装置的束流整形体设计[J]. 物理学报, 2018, 67 (14) : 142801. DOI: 10.7498/aps.67.20180380.

Tian YS, Hu ZL, Tong JF, et al. Design of beam shaping assembly based on 3.5 MeV radio-frequency quadrupole proton accelerator for boron neutron capture therapy[J]. Acta Phys. Sin, 2018, 67 (14) : 142801. DOI: 10.7498/aps.67.20180380.

(收稿日期: 2021-11-22)

(上接第 300 页)

- [13] 周宁, 邓磊, 王哲, 等. 2014—2018年江西省医用放射工作人员外照射个人剂量监测结果分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2021, 41 (2) : 116-121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.02.007.

Zhou N, Deng L, Wang Z, et al. Monitoring results of individual doses to medical radiation workers in Jiangxi Province from 2014 to 2018[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2021, 41 (2) : 116-121. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.02.007.

- [14] 丁艳秋, 郭文, 胡爱英, 等. 眼晶体、指环剂量计的部分剂量学性能实验测试研究[J]. 中国辐射卫生, 2021, 30 (1) : 1-4, 9. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.001.

Ding YQ, Guo W, Hu AY, et al. Experimental research on partial dosimetric performance for eye lens dosimeter and ring dosimeter[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30 (1) : 1-4, 9. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.01.001.

- [15] 杨文栋, 武荣国. 环境热释光累积剂量测量实验研究[J]. 环境科学导刊, 2021, 40 (3) : 92-96. DOI: 10.13623/j.cnki.hkdk.2021.03.019.

Yang WD, Wu RG. Experimental research of environmental

thermoluminescence (TL) cumulative dose measurement[J]. Environ Sci Surv, 2021, 40 (3) : 92-96. DOI: 10.13623/j.cnki.hkdk.2021.03.019.

- [16] 陈爱, 周睿东, 陈文涛, 等. 降雨对连续^γ辐射测量影响的数值拟合[J]. 辐射防护, 2017, 37 (5) : 361-368.

Chen A, Zhou RD, Chen WT, et al. Numerical simulation of ^γ radiation measurement in rainfall[J]. Radiat Protect, 2017, 37 (5) : 361-368.

- [17] 宋海青, 陈志东. 环境热释光剂量测量不确定度评估[C]//中国核学会2017年学术年会论文集第5册. 威海: 中国核学会, 2017: 289-292.

Song HQ, Chen ZD. Evaluation the measurement uncertainty of thermoluminescence dosimetry in environmental monitoring[C]//Proceedings of the 2017 Conference of China Nuclear Society. Weihai: China Nuclear Society, 2017: 289-292.

- [18] Baeza A, Caballero JM, Corbacho JA, et al. Response of an automatic air monitoring gamma-spectrometry station based on sample retention to rainfall-caused dosimetric alterations and to environments with a wide range of radon levels[J]. Radiat Meas, 2020, 134: 106324. DOI: 10.1016/j.radmeas.2020.106324.

(收稿日期: 2021-11-02)