

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.004

· 论 著 ·

石岛湾核电站周边地表 γ 辐射水平调查及影响因素研究

齐晨阳¹, 张巍², 张显鹏², 柳怡², 凤志慧¹

1. 山东大学公共卫生学院, 山东 济南 250012; 2. 山东省疾病预防控制中心
公共卫生监测评价所, 山东 济南 250014

摘要: **目的** 对山东省石岛湾核电站运行前周边地表 γ 辐射累积剂量进行监测, 分析剂量水平和影响因素, 推算当地居民年有效剂量。**方法** 选择核电站周边 30 km 内 56 个监测点, 采用热释光剂量片监测法测量环境 γ 辐射剂量, 在 2021 年 4 个监测期(第 1 至 4 期分别为 2021 年 1 月 16 日—4 月 14 日、4 月 15 日—7 月 20 日、7 月 21 日—10 月 21 日和 10 月 22 日—2022 年 1 月 20 日)共 369 天进行 γ 辐射剂量水平调查, 分析其与监测时间、海拔高度和核电站距离之间的关系, 并推算地表 γ 辐射造成的居民年有效剂量, 来反映该区域的地表 γ 辐射本底水平。**结果** 该区域在 4 个监测期内地表 γ 辐射剂量率平均值分别为 (76.196 ± 3.366) 、 (81.773 ± 6.144) 、 (93.554 ± 7.449) 和 (97.604 ± 9.396) nGy/h, 全年地表 γ 辐射剂量率为 (87.282 ± 6.589) nGy/h, 对人体造成的有效剂量为 0.428 mSv。地表 γ 辐射水平在 2021 年 7 月—2022 年 1 月份较高, 距离核电站不同距离组的监测点 γ 辐射剂量率差异没有统计学意义, 本研究结果中未见海拔高度对地表 γ 辐射剂量的影响。**结论** 石岛湾核电站周边地表 2021 年地表 γ 辐射水平处于本底水平。

关键词: 地表 γ 辐射; 热释光测量; 剂量率; 有效剂量; 核电站

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)01-0015-06

Terrestrial gamma radiation level around Shidaowan nuclear power plant, China and influencing factors

QI Chenyang¹, ZHANG Wei², ZHANG Xianpeng², LIU Yi², FENG Zhihui¹

1. School of Public Health, Shandong University, Jinan 250012 China; 2. Institute for Public Health Surveillance and Evaluation, Shandong Center for Disease Control and Prevention, Jinan 250014 China

Abstract: **Objective** To monitor the cumulative terrestrial γ radiation dose around Shidaowan nuclear power plant, Shandong, China before operation, to analyze the dose levels and influencing factors, and to estimate the annual effective dose to local residents. **Methods** Fifty-six monitoring sites were selected within 30 km around the nuclear power plant. The environmental γ radiation dose was measured by the thermoluminescence dosimeter monitoring method. The γ radiation dose levels were investigated for 369 days in four monitoring periods (January 16 to April 14, April 15 to July 20, July 21 to October 21, 2021, and October 22, 2021 to January 20, 2022 for periods I to IV, respectively). Relations between γ radiation and monitoring time, altitude, distance from the nuclear power plant were analyzed, and the annual effective dose of terrestrial γ radiation to residents was estimated to reflect the background terrestrial γ radiation level in the area. **Results** The average values of terrestrial γ radiation dose rate in the four monitoring periods in the area were (76.196 ± 3.366) , (81.773 ± 6.144) , (93.554 ± 7.449) , and (97.604 ± 9.396) nGy/h, respectively, and the terrestrial γ radiation dose rate in the whole year was (87.282 ± 6.589) nGy/h. The effective dose to residents was 0.428 mSv. The terrestrial γ radiation level was high from July 2021 to January 2022. There was no significant difference in the γ radiation dose rate at the monitoring sites with different distance from the nuclear power plant. No impact upon the terrestrial γ radiation dose by the altitude was observed in this study. **Conclusion** The terrestrial γ radiation level around Shidaowan nuclear power plant in 2021 was at the background level.

Keywords: Terrestrial γ radiation; Thermoluminescence measurement; Dose rate; Effective dose; Nuclear power plant

Corresponding author: FENG Zhihui, E-mail: fengzhihui@sdu.edu.cn

基金项目: 山东省医药卫生科技发展计划项目 (202012071286)

作者简介: 齐晨阳 (1996—), 男, 山东禹城人, 硕士研究生, 研究方向公共卫生, E-mail: 1445673950@qq.com

通信作者: 凤志慧, E-mail: fengzhihui@sdu.edu.cn

人类生活环境中的物质可能含有放射性,产生 γ 射线,且长期的 γ 辐射暴露也可能对人类健康构成潜在影响^[1]。地表 γ 辐射剂量是环境辐射监测评价的重要内容之一,其监测数据可用于评估与辐射有关事件的影响^[2-3]。国内部分地区^[4-6]已经开展过此类工作,在全国各地开展此类工作,有助于完善我国本底放射性水平数据信息。

核电站的建设和运行会影响当地的本底辐射水平^[7-8],对周边居民的身体健康造成潜在危害^[9]。山东省威海市荣成市石岛湾核电站自 2012 年建设以来,未见对石岛湾核电站周边环境放射性水平做系统研究的报道。因此本研究于 2021 年对石岛湾核电站周边 30 km 范围内的地表 γ 辐射水平进行监测,为当地放射性本底数据及核电站运行后放射性水平监测提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备 本次研究使用了热释光剂量元件 LiF(Mg、Cu、P),将热释光剂量元件裸片用纸包装,装入塑料袋后胶带固定,运送至各个监测点。测量仪器为 MIRION RE2000A TLD Reader;采用氮气加热,光子计数法获取数据,由软件自动控制预热、测量、退火,元件灵敏度由仪器自动矫正。该设备经过相关

部门检定有效。

1.2 布点与回收 参考《辐射环境监测技术规范》HJ 61—2021^[10],进行地表 γ 辐射的采样和测量。监测地点为石岛湾核电站周围 30 km 半径范围内,共随机选取 16 个监测点,详见表 1。将包装固定好的热释光剂量元件裸片悬挂于距离地面 1 m 处的树干上至少 3 个月。监测时间选择在 2021 年的 1 月 16 日—4 月 14 日、4 月 15 日—7 月 20 日、7 月 21 日—10 月 21 日和 10 月 22—1 月 20 日(2022 年)4 个监测时间段,在上述监测期内分别连续测量 γ 辐射水平,在每期结束后回收热释光剂量元件裸片。

1.3 累积剂量的测量,剂量率和有效剂量的计算

1.3.1 累积剂量的测量与剂量率的计算

$$D = C_f \times (X_i - X_0) \quad 1)$$

公式中, D 为实际测量值,即累积剂量,单位 mGy, X_i 为仪器测量读数, X_0 为本底读数, C_f 为刻度因子,为 5.54×10^{-7} 。校准结果经过中国剂量科学院认证有效。测量结果扣除宇宙射线电离成分。

为便于详细地分析比较目前核电站周边的地表 γ 辐射本底情况,本研究将仪器测出的累积剂量换算为实时剂量率。将实际测量值除以总小时数,即 γ 辐射剂量率,计算公式如下:

表 1 石岛湾核电站周边 30 km 内的 16 个辐射监测点位置汇总表

Table 1 Summary of 16 radiation monitoring sites within 30 km around Shidaowan nuclear power plant

编号	地点	经度	纬度	海拔	大致方位	距离石岛湾核电站
1	林家流民宿	东经122°30'39"	北纬37°0'59"	10米	西北	4.3 km
2	东楮岛风电场	东经122°33'45"	北纬72°18"	10米	东北	6.6 km
3	马栏槽村委	东经122°31'59"	北纬37°0'45"	10米	北	3.5 km
4	东钱家旧村委	东经122°31'21"	北纬36°59'12"	10米	西北	1.1 km
5	西钱家社区服务中心	东经122°30'54"	北纬37°59'2"	20米	西北	1.3 km
6	卢家庄旧橡胶厂	东经122°29'47"	北纬36°58'59"	30米	西北	3.3 km
7	甲子山游客服务中心	东经122°28'57"	北纬36°58'4"	50米	西南	4.7 km
8	留村文体广场	东经122°28'0"	北纬36°57'40"	50米	西南	6.3 km
9	留村某光荣之家	东经122°28'0"	北纬36°57'38"	50米	西南	6.3 km
10	夏庄镇江林庄仓禀实生态农场	东经122°28'17"	北纬37°12'46"	100米	西北	29.6 km
11	寻山街道西迎驾村农场	东经122°28'22"	北纬37°11'37"	60米	西北	25.4 km
12	王连街道客岭村生态农场	东经122°21'27"	北纬37°0'12"	70米	西北	15.7 km
13	虎山镇桥头庄村	东经122°19'15"	北纬36°56'57"	35米	西南	19.9 km
14	崂山街道古塔村	东经122°25'20"	北纬37°4'35"	30米	西北	14.3 km
15	大疃镇小泥沟	东经122°19'50"	北纬37°6'52"	10米	西北	23.6 km
16	崖头街道前密文村	东经122°19'15"	北纬36°56'57"	10米	西北	23.4 km

$$\text{TGRDR} = D \div T \times 10^6 \quad 2)$$

公式中 TGRDR 为地表 γ 辐射剂量率 (terrestrial gamma radiation dose rate), 单位 nGy/h, T 是本监测期总小时数, 为监测天数乘以 24。

1.3.2 有效剂量的计算 根据过往文献^[11] 的公式计算由地表 γ 辐射引起的年有效剂量:

$$\text{AED} = \text{TGRDR} \times \text{DCF} \times \text{OF} \times T \times 10^{-6} \quad 3)$$

公式中, AED 为年有效剂量, mSv; TGRDR 为地表 γ 辐射剂量率 (terrestrial gamma radiation dose rate), mSv; DCF 是剂量转换因子, 为 0.7 (无量纲); OF 为室外暴露系数, 为 0.2^[12] (无量纲); T 为 1 年的总小时数, 为 8760 h。

1.4 统计学分析 数据分析使用软件 Rstudio, 数据经正态性检验部分不符合正态分布, 以 $\bar{x} \pm s$ 表示。使用 KruskalWallis 检验比较不同时间段、不同距离和不同海拔高度所测得的剂量率的差异, 检验水准 $\alpha = 0.05$ 。作图使用软件 Graphpad prism 9 来制作数据统计图。

1.5 质量控制 测量仪器及剂量元件经质量部门检定合格, 在检定周期内使用; 在采样前组织专门人员进行培训, 讲解采样原则, 统一采样方法, 熟练掌握过程后开始正式采样; 同时参考过往文献的质量控制方法^[13], 对实验过程进行严格把控。

2 结 果

2.1 石岛湾核电站周边 16 个监测点地表 γ 辐射剂量的基本情况分析 核电站周边 16 个监测点共连续监测 4 个周期, 时间自 2021 年 1 月 16 日—2022 年 1 月 20 日。每期的 γ 辐射剂量率监测结果列于表 2。每期的 γ 辐射平均剂量率分别为 (76.196 \pm 3.366)、(81.773 \pm 6.144)、(93.554 \pm 7.449)、(97.604 \pm 9.396) nGy/h。从全年来看, 3 号监测点 (马栏村村委) 的 γ 辐射剂量率平均值最低, 为 (72.982 \pm 7.501) nGy/h, 1 号监测点平均值 (林家流民宿) 最高, 为 (98.518 \pm 5.228) nGy/h。将所有监测点全年的剂量率取平均值即代表了石岛湾核电站周边的总体地表 γ 辐射水平, 为 (87.282 \pm 6.589) nGy/h, 见表 2。

表 2 石岛湾核电站周边 16 个监测点 4 个周期地表 γ 辐射剂量率 (nGy/h, $\bar{x} \pm s$)

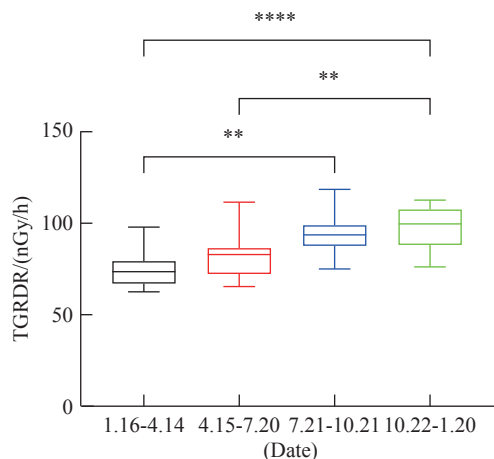
Table 2 Terrestrial γ radiation dose rates during four periods at 16 monitoring sites around Shidaowan nuclear power plant (nGy/h, $\bar{x} \pm s$)

编号	1月16日—4月14日	4月15日—7月20日	7月21日—10月21日	10月22—1月20日	全年平均
1	76.67 \pm 0.822	111.586 \pm 1.966	118.555 \pm 8.91	87.26 \pm 9.214	98.518 \pm 5.228
2	74.071 \pm 1.099	90.17 \pm 3.491	99.108 \pm 6.08	107.826 \pm 4.585	92.794 \pm 3.814
3	69.861 \pm 2.632	70.805 \pm 12.673	75.058 \pm 3.479	76.204 \pm 11.221	72.982 \pm 7.501
4	96.217 \pm 8.564	69.645 \pm 13.628	82.067 \pm 3.974	103.966 \pm 10.048	87.974 \pm 9.053
5	94.114 \pm 1.304	83.895 \pm 2.171	91.101 \pm 4.938	85.549 \pm 8.721	88.665 \pm 4.284
6	66.166 \pm 3.612	95.58 \pm 11.147	98.348 \pm 3.816	110.58 \pm 5.28	92.669 \pm 5.964
7	72.991 \pm 1.368	77.028 \pm 1.857	100.353 \pm 2.892	95.264 \pm 1.666	86.409 \pm 1.946
8	76.571 \pm 2.006	82.224 \pm 3.594	97.356 \pm 5.006	98.386 \pm 9.362	88.634 \pm 4.992
9	66.114 \pm 1.489	83.993 \pm 2.071	93.175 \pm 8.058	101.099 \pm 13.989	86.095 \pm 6.401
10	77.93 \pm 4.12	77.349 \pm 10.911	87.831 \pm 3.189	112.637 \pm 13.318	88.937 \pm 7.884
11	97.889 \pm 2.409	85.061 \pm 2.554	87.046 \pm 21.536	108.456 \pm 11.088	94.613 \pm 9.396
12	79.763 \pm 5.762	83.74 \pm 6.722	87.577 \pm 16.584	91.051 \pm 18.19	85.533 \pm 11.815
13	62.619 \pm 0.261	86.879 \pm 4.129	90.719 \pm 6.577	105.798 \pm 7.03	86.504 \pm 4.499
14	65.005 \pm 2.107	78.561 \pm 4.95	94.381 \pm 10.461	77.679 \pm 6.567	78.906 \pm 6.021
15	71.928 \pm 4.563	66.458 \pm 6.927	94.132 \pm 6.535	93.045 \pm 13.769	81.391 \pm 7.949
16	71.225 \pm 11.744	65.396 \pm 9.514	100.057 \pm 7.154	106.865 \pm 6.283	85.886 \pm 8.674
每期平均	76.196 \pm 3.366	81.773 \pm 6.144	93.554 \pm 7.449	97.604 \pm 9.396	87.282 \pm 6.589

2.2 地表 γ 辐射水平在 4 个监测时期的变化特点 图 1 呈现了本次测量结果在 4 个不同监测时期

的变化。第 3 期的 γ 辐射剂量率平均水平高于第 1 期 ($H = 3.636$, $P < 0.01$), 差异有统计学意义, 第

4 期比第 2 和第 1 期的差异也具有统计学意义($H = 3.295$, $P < 0.01$; $H = 4.367$, $P < 0.001$)。该区域地表 γ 辐射水平呈现明显的时间变化特点, 第 3 期至第 4 期(2021 年 7 月 21—2022 年 1 月 20)地表 γ 辐射水平较高。

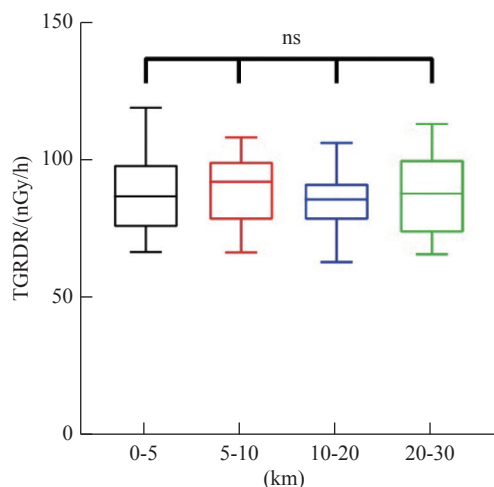


注: “***”表示 $0.001 < P < 0.05$, “****”表示 $P < 0.001$ 。

图 1 不同监测周期地表 γ 辐射剂量率变化特点

Figure 1 Variation characteristics of terrestrial γ radiation dose rates during different monitoring periods

2.3 地表 γ 辐射水平随石岛湾核电站距离的变化特点 为了研究 γ 辐射水平与核电站的距离之间的变化关系, 本研究将各监测点的全年地表 γ 辐射剂量率按照距核电站不同半径范围进行了比较分析。图 2 结果显示, 将监测点与核电站的距离分成 0~5、5~10、10~20 和 20~30 km 4 个距离组, 各组内各监测点的全年 γ 辐射剂量率平均水平为 87.869、89.174、83.648 和 87.707 nGy/h, 4 个距离组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。



注: “ns”表示 $P > 0.05$ 。

图 2 地表 γ 辐射剂量率在距核电站不同距离的变化特点

Figure 2 Variation characteristics of terrestrial γ radiation dose rates in different distance from the nuclear power plant

2.4 地表 γ 辐射水平随海拔高度的变化特点 为了研究地表 γ 辐射与海拔高度的关系, 本研究将每个监

测点的全年地表 γ 辐射剂量率按照不同的海拔高度进行分组, 如图 3。在 0~10 m、10~50 m 和 50~100 m 海拔高度区间, 各组的全年 γ 辐射剂量率平均水平依次为 86.591、86.84 和 89.694 nGy/h, 统计学分析显示各组间差异无统计学意义($P > 0.05$)。

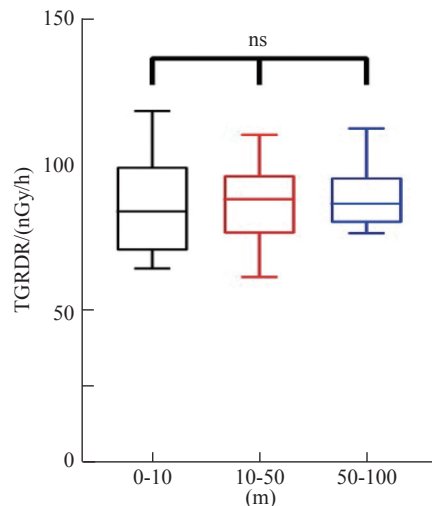


图 3 地表 γ 辐射剂量率在不同海拔高度的变化特点

Figure 3 Variation characteristics of terrestrial γ radiation dose rates in different altitudes

3 讨论

本研究通过使用热释光剂量设备对山东省石岛湾核电站运行前的地表辐射剂量进行了监测, 监测时长为 369 d(2021 年 1 月 16 日—2022 年 1 月 20 日), 监测周期为 3 个月, 共 4 次。此次随机选择距石岛湾核电站 30 km 半径范围内的 16 个监测点, 布放热释光剂量元件裸片, 按时回收监测, 通过计算得到该区域 γ 辐射剂量率的本底水平为 (87.282 ± 6.589) nGy/h, 对人体造成的年有效剂量为 0.428 mSv。该结果是自石岛湾核电站建设以来首次对其周边环境进行的地表 γ 辐射水平的监测评价, 是该地域重要的环境辐射水平基础数据, 为后续的健康风险评估以及流行病学调查等研究提供了第一手材料和科学依据。

本研究结果显示 2021 年 7 月 21 日至 2022 年 1 月 20 日期间地表 γ 辐射水平较高, 有文献报道季节可能会对地表 γ 辐射水平造成影响。如日照时间、大气压力、海拔和降雨等因素对地表 γ 辐射水平有显著影响^[11]。另外太阳活动如风暴、耀斑等也会影响 γ 辐射水平, 因此处于本次监测期间的太阳耀斑活动情况亟待进一步研究。在 16 个监测点中, 林家流民宿在全年的平均剂量率较高, 马栏村村委的剂量率较低, 但从每个监测周期分析, 上述 2 个监测点并不始终保持最高或者最低, 提示在本底水平监测方面, 还

须进一步延长监测时间方能更准确的代表辐射剂量水平。在本研究中,海拔高度对辐射水平没有影响;其他的自然因素对该地域的地表 γ 辐射水平的影响还需深入探讨。另一方面,剂量片悬挂于距离地面一定高度,由于土壤也会向地面不断地释放 γ 辐射,因此土壤的性质可能是影响地表 γ 辐射测量结果的原因之一。例如由花岗岩形成的土壤可能具有更高的 γ 辐射水平,花岗岩中的铀、钍等元素含量高于其他地壳岩石^[12],那么本次研究区域的 γ 辐射水平是否与其土壤构成成分有关,还需进一步研究。

通过与国内其他核电站周边环境的地表 γ 辐射水平进行比较,本次研究结果低于大亚湾核电站 2020 年^[14]、阳江核电站外围 2014—2017 年^[15]、田湾核电站 2017—2019 年^[16]、福清核电站运行前^[17]、海南昌江核电站 2013 年^[18]和三门核电站 2011—2013 年^[19]报道的监测水平,高于秦山核电站 1992—2012 年^[20]期间监测的 γ 辐射水平。

在本研究中,由于部分地点不具备布点条件而未能采集到相应数据,后续研究可适当增加监测点的设置以获得更多更具有代表性的数据。由于样本量的限制,本研究未得出海拔对地表 γ 辐射的影响。另外根据 HJ 61—2021 推荐的 γ 辐射环境监测方法(GB/T 14583),对于大型核设施要至少连续监测 2 年,每一批热释光剂量元件的布放要按照每个季度 1 次,每次至少 3 个月,布放完成后的剂量元件要装入防水、防潮、防尘的密封盒内,并装入铅罐中运输。未来进行相关研究时还须考虑核电站周围是否有其他铀、钍矿设施或其他人为活动可能引起天然辐照增加情况等。综上,本研究结果提供了石岛湾核电站周边区域的地表 γ 辐射水平的原始数据,为深入进行该地区的环境辐射流行病学研究提供了参考。

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 齐晨阳负责设计研究思路、实验数据分析和撰写文章;张巍负责实验设计与实施及指导撰写论文;张显鹏负责实验过程的监测、质控和实验数据的收集;柳怡负责实验材料准备及热释光剂量片布放;凤志慧负责提出研究选题、修订文章、终审论文

参考文献

- [1] Yin J, Hu N, Yi L, et al. Identification of ferroptosis biomarker in AHH-1 lymphocytes associated with low dose radiation[J]. *Health Phys*, 2021, 120 (5): 541-551. DOI: [10.1097/HP.0000000000001385](https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001385).
- [2] Torres SB, Petrik A, Szabó KZ, et al. Spatial relationship between the field-measured ambient gamma dose equivalent rate and geological conditions in a granitic area, Velence Hills, Hungary: an application of digital spatial analysis methods[J]. *J Environ Radioact*, 2018, 192: 267-278. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.07.001).
- [3] Folly CL, Konstantinoudis G, Mazzei-Abba A, et al. Bayesian spatial modelling of terrestrial radiation in Switzerland[J]. *J Environ Radioact*, 2021, 233: 106571. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2021.106571](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106571).
- [4] 谢天成, 谢正观. 北京市重点地区 γ 辐射水平监测与评价[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6 (6): 74-77. DOI: [10.3969/j.issn.1009-6094.2006.06.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6094.2006.06.020).
- Xie TC, Xie ZG. Monitoring and assessment of environmental γ radiation in the principal areas of Beijing[J]. *J Saf Environ*, 2006, 6 (6): 74-77. DOI: [10.3969/j.issn.1009-6094.2006.06.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6094.2006.06.020).
- [5] 李林御, 贺良国. 2013—2020 年四川省地表 γ 辐射水平及所致居民剂量分析[J]. *预防医学情报杂志*, 2022, 38 (6): 810-813, 818. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4028.2022.6.yfyxqbzz202206014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4028.2022.6.yfyxqbzz202206014).
- Li LY, He LG. Analysis on the surface gamma radiation levels and residents exposure dose in Sichuan Province from 2013 to 2020[J]. *J Prev Med Inf*, 2022, 38 (6): 810-813, 818. DOI: [10.3969/j.issn.1006-4028.2022.6.yfyxqbzz202206014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4028.2022.6.yfyxqbzz202206014).
- [6] 刘露, 吴田勇, 苏勤, 等. 泸州市地表 γ 辐射剂量率水平分析[J]. *职业与健康*, 2020, 36 (21): 2970-2973. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2020.0811](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2020.0811).
- Liu L, Wu TY, Su Q, et al. Analysis on surface gamma radiation dose rate level in Luzhou City[J]. *Occup Health*, 2020, 36 (21): 2970-2973. DOI: [10.13329/j.cnki.zyyjk.2020.0811](https://doi.org/10.13329/j.cnki.zyyjk.2020.0811).
- [7] Harris C, Kreeger D, Patrick R, et al. Twenty-five years of environmental radionuclide concentrations near a nuclear power plant[J]. *Health Phys*, 2015, 108 (5): 503-513. DOI: [10.1097/HP.000000000000266](https://doi.org/10.1097/HP.000000000000266).
- [8] 郭英来. 田湾核电站商运前后周边降水和大气中氡浓度比较[J]. *辐射防护*, 2014, 34 (1): 38-40, 64. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8187.2014.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8187.2014.01.008).
- Guo YL. Comparison of tritium concentration in rainwater and atmosphere around TNPS before and after commercial service[J]. *Radiat Prot*, 2014, 34 (1): 38-40, 64. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8187.2014.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8187.2014.01.008).
- [9] 董建梅, 李伟伟, 秦绪成, 等. 2007—2015 年田湾核电站周围地区恶性肿瘤发病分析[J]. *中国肿瘤*, 2021, 30 (2): 124-130. DOI: [10.11735/j.issn.1004-0242.2021.02.A004](https://doi.org/10.11735/j.issn.1004-0242.2021.02.A004).
- Dong JM, Li WW, Qin XC, et al. Cancer incidence in 0 ~ 30 km area around Tianwan nuclear power plant, 2007-2015[J]. *China Cancer*, 2021, 30 (2): 124-130. DOI: [10.11735/j.issn.1004-0242.2021.02.A004](https://doi.org/10.11735/j.issn.1004-0242.2021.02.A004).
- [10] 中华人民共和国生态环境部. HJ 61—2021 辐射环境监测技术规范[S]. 北京, 2021.

- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. HJ 61—2021 Technical specification for radiation environmental monitoring[S]. Beijing, 2021.
- [11] Feng WL, Zhang YF, Li YL, et al. Spatial distribution, risk assessment and influence factors of terrestrial gamma radiation dose in China[J]. *J Environ Radioact*, 2020, 222: 106325. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106325.
- [12] The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Sources and effects of ionizing radiation[R]. United Nations: UNSCEAR, 2000.
- [13] 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.
- [14] 张伟珠, 林淑倩, 孔杜娟, 等. 热释光剂量计在核电厂环境监测中的应用[J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31(3): 296-300, 310. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.03.007.
- Zhang WZ, Lin SQ, Kong DJ, et al. Application of thermoluminescence dosimeter in environmental monitoring of nuclear power plant[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31(3): 296-300, 310. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.03.007.
- [15] 张华, 徐润龙, 林炜伟. 2014—2017年广东省阳江核电站外围 γ 辐射空气吸收剂量率监测结果[J]. *辐射防护通讯*, 2018, 38(2): 41-43. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2018.02.009.
- Zhang H, Xu RL, Lin WW. Continuous monitoring of γ air absorbed dose rate at Yangjiang NPP, Guangdong Province, from 2014 to 2017[J]. *Radiat Prot Bull*, 2018, 38(2): 41-43. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2018.02.009.
- [16] 曹鹏涛, 王文军, 王志玉. 2017—2019田湾核电站外围瞬时剂量率分析[J]. *科学技术创新*, 2020, (28): 46-47. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2020.28.022.
- Cao PT, Wang WJ, Wang ZY. 2017—2019 Tianwan Nuclear Power Plant peripheral instantaneous dose rate analysis[J]. *Sci Technol Innovation*, 2020, (28): 46-47. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1328.2020.28.022.
- [17] 刘祥铨, 张晓阳, 吴京颖, 等. 福清核电站运行前环境 γ 辐射水平及所致居民剂量估算[J]. *中国辐射卫生*, 2015, 24(5): 520-521. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2015.05.029.
- Liu XQ, Zhang XY, Wu JY, et al. Gamma radiation levels in terrestrial environment and resultant population dose before operation of Fuqing nuclear power plant[J]. *Chin J Radiol Health*, 2015, 24(5): 520-521. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2015.05.029.
- [18] 陈玉坤, 王川健, 王龙义, 等. 海南昌江核电站周围环境地表 γ 辐射剂量率本底调查[J]. *中国热带医学*, 2014, 14(10): 1189-1191. DOI: 10.13604/j.cnki.46-1064/r.2014.10.058.
- Chen YS, Wang CJ, Wang LY, et al. Survey of environmental terrestrial gamma-radiation baseline levels around Hainan Changjiang nuclear power station[J]. *China Trop Med*, 2014, 14(10): 1189-1191. DOI: 10.13604/j.cnki.46-1064/r.2014.10.058.
- [19] 应正巨, 章群, 边国林, 等. 某核电厂毗邻区域地表 γ 外照射剂量率水平调查[J]. *环境与职业医学*, 2014, 31(3): 217-219. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2014.0052.
- Ying ZJ, Zhang Q, Bian GL, et al. Gamma radiation dose in terrestrial environment in proximity to a nuclear power plant[J]. *J Environ Occup Med*, 2014, 31(3): 217-219. DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2014.0052.
- [20] 陈群华, 宋建锋, 郑惠娣. 秦山核电基地外围环境 γ 辐射剂量率水平监测回顾[J]. *能源环境保护*, 2014, 28(6): 58-60, 49. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2014.06.017.
- Chen QH, Song JF, Zheng HD. Monitoring review of environmental gamma radiation dose rate around Qinshan NPP[J]. *Energy Environ Prot*, 2014, 28(6): 58-60, 49. DOI: 10.3969/j.issn.1006-8759.2014.06.017.

(收稿日期: 2022-08-05)