

某核电厂毗邻区域地表 γ 外照射剂量率水平调查

应正巨, 章群, 边国林, 屈凌燕

摘要: [目的] 收集三门核电厂运行前毗邻区域环境中的 γ 辐射剂量监测数据, 确定环境本底水平及短期变化和长期变化趋势, 以及评价对当地居民的影响, 为居民健康评估、应急事件的应对提供参考, 为放射环境管理提供科学依据。[方法] 参照相关国家标准, 制定三门核电厂宁波毗邻区域地表 γ 外照射剂量率水平监测技术方案, 选取与三门湾核电厂相邻的宁波市N县7个乡镇的13个自然村、X县2个乡镇的6个自然村作为监测点, 用热释光累积剂量法监测地表 γ 辐射剂量, 一年4次, 每次3个月。监测时段为2011年7月—2013年6月24个月。[结果] 对二年监测周期中每12个月4次数据按原野和室内分别进行单因素方差分析, 第1个监测周期, 原野: $F=0.452$, $P=0.716$, 室内: $F=0.442$, $P=0.723$ 。第2个监测周期, 原野: $F=0.345$, $P=0.793$, 室内: $F=0.261$, $P=0.853$ 。表明无论是室内还是原野的地表 γ 辐射水平均无明显季节性差异。该地区人均年有效剂量为0.87 mSv。[结论] 三门核电厂宁波毗邻区域地表 γ 外照射剂量率在正常水平, 本次调查为该核电厂宁波毗邻区域地表 γ 外照射剂量率建立了核电厂运行前的本底数据。

关键词: γ 辐射; 辐射剂量; 人均年有效剂量; 核电厂

Gamma Radiation Dose in Terrestrial Environment in Proximity to a Nuclear Power Plant YING Zheng-ju, ZHANG Qun, BIAN Guo-lin, QU Ling-yan (Department of Environmental and Occupational Health, Ningbo Center for Disease Control and Prevention, Zhejiang 315010, China) · The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract: [Objective] To monitor the gamma radiation dose in terrestrial environment near the Sanmen Nuclear Power Plant prior and posterior to its commercial debut, determine the background level, short-term and long-term trends, and evaluate its effects on nearby residents. [Methods] A monitoring protocol for the gamma radiation dose in terrestrial environment near the nuclear power plant was developed according to the relevant national standards. Thirteen villages in seven towns of County N and six villages in two towns of Count X were selected as the monitoring sites, all in the prefecture of Ningbo and proximity to the nuclear power plant. Gamma radiation dose rate was measured by cumulative thermoluminescence dosimetry using three months as basic time scale, four times a year. The data collection work was done in the period from July 2011 to June 2013. [Results] The data were classified into two groups: field and indoor data. The results of ANOVA showed no seasonal difference in the gamma radiation doses from field or from indoor (for 2011, field: $F=0.452$, $P=0.716$; indoor: $F=0.442$, $P=0.723$; for 2012, field: $F=0.345$, $P=0.793$; indoor: $F=0.261$, $P=0.853$). The annual effective dose per capita was 0.87 mSv. [Conclusion] The gamma radiation dose rate in terrestrial environment near the Sanmen Nuclear Power Plant is at a normal level. This paper provides a background level of the gamma radiation dose before the plant's commercial debut as reference for further radiation surveillance program design.

Key Words: gamma radiation; radiation dose; annual effective dose per capita; nuclear power plant

2004年7月, 位于浙江省南部的三门核电站一期工程建设获得国务院批准。这是继秦山核电站之后, 获准在浙江省境内建设的第二座核电站。该电站位于浙江省东部沿海的台州市三门县, 与宁波N县陆地最近距离7.5 km, 与宁波X县最近距离为13.5 km。本次监测调查是三门核电厂运行前宁波毗邻区域地表环境 γ 外照射剂量率的本底调查。建立核电站运行前基线

数据, 为后期评估核电厂运行前后宁波毗邻区域环境本底水平短期变化和长期变化趋势提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 监测点设置

选择三门湾核电厂相邻的宁波市N县7个乡镇的13个自然村、X县2个乡镇的6个自然村共计19个自然村作为监测点。最近、最远的监测点与在建三门核电厂距离分别为7、30 km左右, 所选监测点位于三门核电厂的东面和北面。每个点分别选取原野和建筑物室内进行测量, 各8个探测器, 未布设道路监测点。在原野布设时, 布设点距离附近高大建筑物的距离 >15 m, 离地面高度为 (1.0 ± 0.2) m, 尽量选择学校、公园或果园的树丛中, 2个剂量盒分开放置, 以防同时丢失。在室

DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2014.0052

[基金项目] 三门湾经济区域宁波居民核辐射健康风险评估研究项目 (编号: 2012A610188)

[作者简介] 应正巨(1969—), 男, 学士, 副主任医师; 研究方向: 放射防护; E-mail: tony6979@vip.qq.com

[作者单位] 宁波市疾病预防控制中心环境与职业卫生所, 浙江 315010

内布设时,监测点尽量选择村干部或联络员的家。监测时跨 2011 年 7 月—2013 年 6 月 24 个月。2 个监测周期 8 次(每 12 个月 4 次,每次 3 个月)共计布放 608 个剂量盒,回收 596 个,探测器的回收率为 98.03%。

1.2 探测器准备、布设

主要仪器为 RGD-3A 型热释光剂量仪、GR200A 型 ^{60}Co (Mg, Cu, P) 圆片探测器及 TLD-469 型剂量盒(北京防化研究院), BR2000A 退火炉(北京博创特科技)。探测器按 240°, 10 min 的程序进行退火,装入铅罐,备用(储存时间不超过 1 周)。在布设当天把退火后的探测器装入剂量盒,每个剂量盒装 4 个探测器,每个点 2 个剂量盒,共 8 个探测器。

1.3 数据处理

1.3.1 剂量率计算 每个布设点取平均值,扣去宇宙射线读数后,乘以刻度系数,得出累积剂量,除以监测时间后,得出环境 γ 辐射剂量率,未考虑剂量衰退。公式: $D_0=1000N_cK_f/h-D_\gamma$ 。式中, D_0 为地表 γ 辐射剂量(吸收剂量 nGy/h), 1000 为 μGy 转换至 nGy 的系数, N_c 为布设点测读值, D_γ 为宇宙射线, K_f 刻度因子, h 为监测时间。

宇宙射线室外值参考浙江省环境辐射水平调查中大水面上测量的宇宙辐射值 $3.0 \times 10^{-8} \text{Gy/h}^{[1]}$; 宇宙射线的室内值考虑到现在的监测地区的农村房屋结构以 3~4 层为主,屏蔽因子取 0.7, 即 $2.1 \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ 。

1.3.2 年有效剂量计算 天然贯穿辐射外照射所致人均年有效剂量当量包括两部分: 天然陆地辐射(γ)和宇宙射线辐射(c)所致人均有效剂量当量。 $H_e(\gamma)=[D_a(\text{原野})(1-q)+D_a(\text{室内}) \times q] \times 8760 \times 0.7(\times 10^{-6} \text{mSv})$ 。 $H_e(c)=[D_a(\text{室外})(1-q)+D_a(\text{室内}) \times q] \times 8760 \times 1.0(\times 10^{-6} \text{mSv})$ 。式中, $H_e(\gamma)$ 为天然陆地辐射所致人均年有效剂量当量; D_a 为空气吸收剂量率(nGy/h); $H_e(c)$ 为宇宙射线电离成分所致人均年有效剂量当量, 0.7 和 1.0 分别为 γ 辐射、宇宙射线所致公众有效剂量当量对空气吸收剂量率的平均值; 8760 为全年时间的小时数; q 和 $(1-q)$ 分

别为室内和室外居留因子,取值参考杭州市的居留因子取值 $q=0.8$ 。如前所述,宇宙射线的屏蔽因子取 0.70。

天然本底辐射外照射所致个人年有效剂量: $He=He(\gamma)+He(c)$ 。人均年有效剂量只简单计算 19 个点的平均值,未作加权平均。

因为布点未按网格法,且布点仅局限于三门湾毗邻地区,未计算监测所涉及的 2 个县集体剂量。

1.4 质量控制

在方案实施之前用 BH3103B 便携性 χ - γ 剂量率仪(中核北京仪器厂)选取 10 个监测点,对其原野进行 γ 瞬间剂量率的预监测,以了解所监测地区 γ 外照射剂量率大致水平。按标准^[2]及实验室要求,对测读系统进行质量控制;使用同一批的探测器和剂量盒,统一退火、测读程序,并由同一人完成操作;对于布设在室外的剂量计外包一层保鲜膜,且放置一定量的干燥剂,防止雨水进入导致探测器受潮。布设 3 个月后,回收剂量计,在实验室进行测读,回收至测读的时间不超过 3 d。从国家二级标准剂量学实验室获取刻度系数。按规定对数据进行修约和扩展不确定度计算。

1.5 统计学分析

实验结果资料整理后,采用 Excel 2003、SPSS 19.0 进行资料整理、统计分析。采用单因素方差分析,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 环境 γ 辐射剂量率预监测结果

选取原野 10 个点,所得结果未扣除宇宙射线的影响。最大值 $15 \times 10^{-8} \text{Gy}$, 出现在 N 县城关某康复中心;最小值 $8 \times 10^{-8} \text{Gy}$, 出现在 X 县离海很近的某村;平均值 $11.8 \times 10^{-8} \text{Gy}$ 。

2.2 γ 本底辐射剂量率

计算每个点的监测值的相对扩展不确定度在 8%~11% 之间,小于 20%。符合标准^[3]的要求。各个监测点 2 年间各时段的剂量率见表 1。

表 1 三门核电厂宁波毗邻区域各个监测点剂量(平均值 nGy/h)

| 监测点 | 2011 年 7—9 月 | | 2011 年 10—12 月 | | 2012 年 1—3 月 | | 2012 年 4—6 月 | | 2012 年 7—9 月 | | 2012 年 10—12 月 | | 2013 年 1—3 月 | | 2013 年 4—6 月 | |
|-----|--------------|--------|----------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|----------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 |
| 1 | 78.13 | 115.58 | 72.09 | 109.42 | 72.65 | 112.87 | 85.23 | 114.28 | 84.69 | 115.44 | 70.47 | 106.51 | 74.55 | 108.62 | 76.65 | 118.38 |
| 2 | 79.78 | 116.38 | 72.08 | 108.31 | 72.56 | 109.39 | 83.06 | 120.03 | 86.90 | 125.25 | 78.64 | 109.07 | 69.26 | 107.14 | 74.63 | 108.45 |
| 3 | 88.62 | 116.83 | 72.20 | 103.55 | 79.36 | 105.79 | 77.91 | 103.28 | 81.33 | 106.74 | 79.16 | 104.90 | 74.54 | 117.83 | 92.51 | 102.51 |
| 4 | 91.02 | 127.14 | 82.91 | 117.70 | 82.51 | 128.59 | 95.93 | 115.90 | 96.90 | 113.59 | 84.68 | 120.15 | 78.94 | 124.72 | 90.30 | 125.38 |
| 5 | 85.56 | 119.37 | 88.67 | 101.40 | 76.28 | 114.39 | 76.68 | 101.83 | 72.95 | 115.85 | 90.28 | 103.37 | 80.13 | 116.44 | 78.56 | 99.81 |
| 6 | 62.13 | 94.75 | 53.85 | 87.31 | 59.65 | 98.10 | 57.82 | 89.71 | 59.59 | 100.70 | 55.78 | 113.31 | 57.28 | 103.21 | 63.43 | 106.12 |
| 7 | 64.47 | 75.34 | 64.13 | 85.32 | 67.02 | 82.73 | 62.25 | 82.81 | 68.31 | 104.73 | 67.20 | 99.19 | 60.02 | 100.26 | 64.49 | 108.23 |
| 8 | 80.13 | 139.37 | 74.16 | 121.76 | 82.43 | 120.55 | 71.09 | 141.52 | 79.53 | 137.78 | 74.19 | 128.67 | 70.69 | 125.54 | 85.56 | 135.26 |
| 9 | 85.70 | 107.77 | 91.19 | 117.60 | 83.79 | 108.36 | 85.55 | 104.97 | 92.81 | 112.46 | 88.59 | 115.39 | 82.90 | 98.63 | 85.17 | 105.49 |
| 10 | 90.67 | 120.20 | 94.97 | 120.62 | 92.64 | 126.22 | 98.31 | 136.82 | 99.01 | 124.32 | 93.46 | 116.26 | 92.76 | 128.30 | 95.91 | 135.27 |
| 11 | 94.84 | 135.86 | 101.37 | 129.96 | 92.40 | 135.17 | 97.65 | 154.48 | 102.90 | 132.69 | 95.04 | 137.29 | 94.56 | 147.82 | 95.82 | 134.76 |
| 12 | 88.57 | 126.28 | 89.56 | 125.34 | 82.72 | 128.48 | 94.75 | 142.85 | 84.27 | 130.34 | 92.54 | 140.84 | 87.38 | 128.01 | 89.60 | 127.43 |
| 13 | 87.47 | 149.82 | 83.34 | 132.14 | 78.81 | 146.88 | 88.05 | 131.14 | 90.63 | 130.41 | 85.44 | 144.81 | 84.09 | 153.64 | 80.11 | 134.25 |
| 14 | 86.07 | 129.78 | 71.78 | 127.27 | 87.66 | 118.64 | 62.14 | 108.03 | 74.77 | 118.46 | 67.15 | 106.12 | 91.10 | 129.44 | 85.49 | 124.87 |
| 15 | 96.54 | 117.77 | 79.52 | 133.67 | 71.15 | 93.95 | 88.18 | 106.28 | 80.27 | 104.29 | 84.78 | 120.76 | 78.48 | 131.67 | 89.93 | 92.39 |
| 16 | 96.43 | 128.92 | 98.03 | 104.30 | 91.41 | 133.72 | 89.68 | 111.14 | 97.34 | 103.14 | 96.27 | 116.29 | 92.31 | 138.70 | 88.58 | 113.47 |

续表 1

| 监测点 | 2011 年 7—9 月 | | 2011 年 10—12 月 | | 2012 年 1—3 月 | | 2012 年 4—6 月 | | 2012 年 7—9 月 | | 2012 年 10—12 月 | | 2013 年 1—3 月 | | 2013 年 4—6 月 | |
|-----|--------------|--------|----------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|----------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 | 原野 | 室内 |
| 17 | 73.79 | 116.10 | 74.68 | 105.73 | 70.11 | 108.98 | 72.86 | 128.95 | 70.69 | 126.59 | 78.41 | 110.89 | 68.93 | 103.77 | 72.81 | 117.20 |
| 18 | 98.64 | 134.26 | 104.64 | 128.22 | 108.00 | 121.59 | 95.50 | 126.79 | 105.02 | 126.93 | 93.64 | 136.14 | 110.33 | 114.07 | 98.97 | 125.22 |
| 19 | 66.80 | 96.12 | 67.83 | 91.61 | 73.20 | 93.50 | 68.74 | 98.66 | 65.38 | 103.63 | 66.39 | 96.51 | 77.02 | 109.21 | 67.82 | 100.01 |

[注]表中已扣除宇宙射线。

对每一监测周期(12个月)的4次数据按原野和室内分别进行单因素方差分析,第1个监测周期,原野: $F=0.452$, $P=0.716$; 室内: $F=0.442$, $P=0.723$ 。第2个监测周期,原野: $F=0.345$, $P=0.793$; 室内: $F=0.261$, $P=0.853$ 。结果表明,无论是室内还是原野的地表 γ 辐射水平均无明显季节性差异。

2个监测周期原野和室内各19个监测点总体情况,见表2。

表 2 各监测周期各类型监测点剂量率(nGy/h)

| 监测点类型 | 范围 | $\bar{x} \pm s$ |
|-----------------|--------------|-----------------|
| 2011-07—2012-06 | | |
| 原野 | 53.85~108.00 | 81.69 ± 12.02 |
| 室内 | 75.34~154.48 | 116.13 ± 16.83 |
| 2012-07—2013-06 | | |
| 原野 | 55.78~110.33 | 82.07 ± 11.98 |
| 室内 | 76.19~153.64 | 116.06 ± 16.48 |

2.3 人均年有效剂量

地表 γ 辐射水平所致公众人均年有效剂量为0.67 mSv,宇宙射线所致公众年有效剂量为0.20 mSv,人均年有效剂量为0.87 mSv。由此得三门湾核电站宁波毗邻区域环境天然电离辐射外照射所致公众年有效剂量为0.87 mSv。

3 讨论

宁波属北亚热带湿润季风气候区。气候温和湿润,四季分明,雨量充沛,冬夏季风交替明显。冬季盛行西北风,夏季受太平洋副热带高压控制,盛行东南风,此外还会受到台风的影响。本次调查布点均位于核电站周围50 km范围内的东面和北面,分别容易受到西北风和东南风的影响。

本次调查采用热释光累积剂量法,而未采用环境 γ 剂量率仪监测瞬间剂量率的方法,不同于国家卫生部和国家环保局在20世纪80年代分别完成的全国调查^[4]。二种方法各有利弊,能满足环境 γ 剂量率监测的不同需求。环境 γ 剂量率仪更直观,而热释光累积剂量法更能反映全年的情况,更有代表性。前人的研究报告中用剂量率仪监测即时天然贯穿辐射比较多,往往没有区分天然陆地辐射和宇宙射线辐射^[5-6]。本次调查在这方面有所改变。

本次调查第1个监测周期(2011年7月—2012年6月)和第2个监测周期(2012年7月—2013年6月)的原野平均值分别为81.69 nGy/h和82.07 nGy/h,室内的的平均值分别为116.13 nGy/h和116.06 nGy/h,无论是原野还是建筑物室内的地表 γ 本底辐射均无明显的季节性差异。在扣除宇宙射线对 γ 剂量率仪所得瞬间剂量率影响后,热释光累积剂量法所得原野的平均值与剂量率范围与 γ 剂量率仪所得瞬间剂量率比较接近。

本次监测调查中,三门湾核电站宁波毗邻区域人均年有效剂量为0.87 mSv,低于浙江省的平均值1.01 mSv^[3]。相比全省的平均值,约低12%。调查结果不同的可能原因,一方面是因为调查的范围不同,本次调查地区比较局限,且调查点都位于海边,其土壤结构都为海涂堆积,不同于浙江省大部分地区以丘陵为主;另一方面监测方法不同。本次监测未采用国家标准规定的网格布点方法,亦未对道路进行监测;而使用的是热释光累积剂量法,而浙江省的数据采取的是闪烁仪测量法和土壤 γ 能谱测量法的平均值^[1]。

本次研究存在很多不足之处。首先,本次监测调查选取了三门湾核电站宁波毗邻区域19个自然村作为监测点进行测量,未按网格法均匀布点,且每个布点均未设道路监测点。以后应扩大监测范围,考虑增设道路监测点。其次,本次调查限于地域,未能对三门湾核电站台州侧的毗邻地区进行地表 γ 本底辐射的监测。第三,本次调查的宇宙射线室外值参考浙江省环境辐射水平调查中大水面上测量的宇宙辐射值,而并未同步找到水深3 m距岸1.5 km的淡水面上进行测量,在找到合适的水面且方便悬挂热释光环境剂量计时可以考虑同步监测。

热释光累积剂量法监测地表 γ 本底辐射是标准规定比较可靠的方法之一^[2],但其回收率问题是比较突出的。本次调查的回收率为98.03%。这与采取的一系列有效措施有关,比如室内布放选择联络员或村干部的家,原野布放选择了较隐蔽的灌木丛,并委托专人进行定期巡视检查,防止丢失。这些可以作为以后监测的成功经验。TLD剂量盒的防水防潮也有一定难度,可以考虑在以后的监测中使用塑料封装的 $\text{FiL}(\text{Mg}, \text{Cu}, \text{P})$ 粉末作为探测器。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献:

- [1] 赵义坊, 陈国佩, 王赞信, 等. 浙江省天然本底辐射水平及其所致公众剂量[J]. 中华放射医学与防护杂志, 1994, 14(6): 363-365.
- [2] 国家环境保护局, 国家技术监督局. GB/T 14583—93 环境地表 γ 辐射剂量率测定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [3] 国家技术监督局. GB 10264—88 个人和环境监测用热释光剂量测量系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [4] 王其亮. 中国的天然 γ 辐射剂量率水平[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2000, 20(5): 358-362.
- [5] 陈斌, 谭爱军, 晁斌, 等. 珠海地区环境地表 γ 辐射剂量率调查[J]. 华南预防医学, 2004, 30(4): 49; 51.
- [6] 樊敏. 厦门市环境天然放射性水平监测[J]. 中国环境监测, 2000, 16(1): 33-35.

(收稿日期: 2013-07-17)

(英文编辑: 汪源; 编辑: 王晓宇; 校对: 洪琪)