

2018—2023年防城港核电厂外围辐射水平分析

贾力博, 张巍, 彭文斌, 常青, 谢探春, 李玮衡, 江岳, 崔伦, 王菲

(广西壮族自治区辐射环境监督管理站, 广西南宁 530222)

摘要: 对防城港核电厂外围 31 个监测点位进行了 γ 辐射累积剂量率监测和 γ 辐射空气吸收瞬时剂量率监测, 并对辐射水平监测结果进行分析, 以掌握核电厂外围陆地辐射水平的长期变化状况。结果表明: 2018—2023 年, 防城港核电厂外围环境 γ 辐射累积剂量率监测值为 62.5~141.3 nGy/h, 平均值为 99.1 nGy/h; 瞬时剂量率为 55.0~119.5 nGy/h, 平均值为 93.7 nGy/h; 防城港核电厂 3 台机组商运前后, 外围陆地环境辐射水平保持一致, γ 辐射累积剂量率、瞬时剂量率均保持在正常水平, 核电运行期间气载流出物的排放对外围环境的辐射水平没有产生影响。不同点位的 γ 辐射累积剂量率变化较大, 且随季节性变化呈冬季偏高、夏季偏低的现象, 说明 γ 辐射累积剂量率受环境因素影响较大。

关键词: 累积剂量率; 瞬时剂量率; 核电厂; 辐射水平; 气载流出物; 环境因素

中图分类号: X831; TL75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)02-0103-09

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2024.01.01

防城港核电厂位于广西壮族自治区防城港市企沙半岛东侧, 规划建设 6 台百万千瓦级核电机组, 采用一次规划, 分期建设。其中, 1、2 号机组(一期工程)为单机容量 108 万千瓦的 CPR1000 机组, 已分别于 2016 年 1 月 1 日和 10 月 1 日投入商业运行; 3、4 号机组(二期工程)采用中国自主知识产权的华龙一号三代核电技术, 分别于 2015 年 12 月 24 日和 2016 年 12 月 23 日正式开工建设; 5、6 号机组(三期工程)也将采用华龙一号技术, 目前正在推进前期工作。2023 年 3 月 25 日, 防城港核电 3 号机组已正式投入商运, 后期 4、5、6 号机组将陆续投入商运, 核电机组的运行对外围环境的影响引人关注。

核电厂外围环境辐射水平的变化, 受环境自然条件的影响, 同时与核电运营过程中反应堆人工核素的释放息息相关。核电厂外围环境辐射水平的相关研究主要集中在液态流出物排放对海洋环境的影响^[1-2], 有关核电运营过程中对陆地环境的影响也有报道^[3-5]。目前, 缺乏对广西防城港核电厂外围 γ 辐射累积剂量率的最新监测结果, 为此研究了 2018—2023 年广西防城港核电厂外围

γ 辐射累积剂量率监测数据, 统计分析其累积空气吸收剂量率的空间和时间分布特征, 并对华龙一号三代核电技术商运前后核电厂外围辐射环境变化进行对比, 旨在掌握防城港核电厂外围的辐射环境状况。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

热释光剂量计(TLD), 用于 γ 辐射累积剂量率监测, 热释光测量系统包括 2 台读出器, 即中核控制系统工程有限公司的 FJ427A1 型读出器(2018—2020 年间使用)和 Thermo Fisher Scientific 的 TLD3500 型读出器(2021—2023 年间使用); TLD 探测器采用 LiF(Mg、Cu、P)材料的 GR-200A 型(北京光润意通辐射监测设备有限公司)圆片状元件, 探测器的更换周期为 2 年 1 次。试验设备还有 1 台 FJ-417 型照射器(中核控制系统工程有限公司); 1 台 V 型退火炉; 1 台 2000B 远红外精密退火炉; FH40G+FHZ672E-10 型便携式 X- γ 剂量率仪(量程为 1 nSv/h~100 μ Sv/h), 用于监测陆地 γ 辐射空气吸收剂量率和瞬时剂量

收稿日期: 2024-01-09

第一作者简介: 贾力博(1990—), 男, 广西南宁人, 本科, 工程师, 主要从事电离辐射环境监测及评价研究工作。

通信作者简介: 张巍(1993—), 男, 湖南岳阳人, 本科, 工程师, 主要从事电离辐射环境监测及评价研究工作。

率。

1.2 点位布设

以核电厂为中心,半径 50 km,接近密、远疏原则共布设 31 个监测点位(图 1),其中 2 km 内布设 6 个监测点; $\geq 2\sim 5$ km 内布设 4 个监测点; $\geq 5\sim 10$ km 内布设 10 个监测点; $\geq 10\sim 20$ km 内布设 7 个监测点; $\geq 20\sim 50$ km 内布设 4 个监测点。点位一般布设在地势开阔的地方,距离高

大建筑物至少 10 m,离地约 1.0~1.5 m,布放周期约为 3 个月(受疫情影响,2022 年仅测定了后半年的数据);在回收 TLD 的同时布放下一周期的 TLD,并用便携式 X- γ 剂量率仪对监测点进行 γ 剂量率瞬时测量。此外,在 31 个累积剂量布放点的基础上,将检测结果与核电厂周围的 3 个国控点的累积剂量率进行对比。

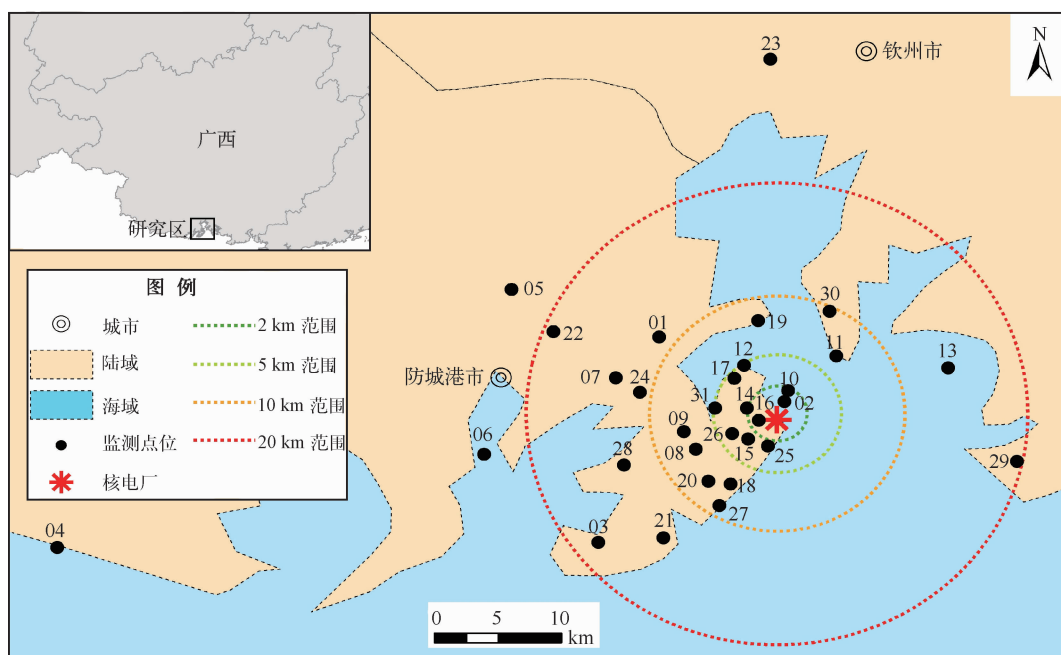


图 1 防城港核电厂辐射水平监测点位分布

Fig. 1 Radiation monitoring locations around Fangchenggang nuclear power plant

1.3 监测方法

参照《个人和环境监测用热释光剂量测定系统》(GB/T 10264—2014)、《辐射环境监测技术规范》(HJ 61—2021)和《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157—2021)进行累积剂量率监测。

热释光测量仪测量参数设置:1)FJ-427A1: $100\ \mu\text{Gy}\sim 4\ \text{Gy}$ (用 JR1152A 型片标定 ^{60}Co γ 源剂量),在线性范围内响应的变化不大于 10%,高压 500 V,升温温度为 240 $^{\circ}\text{C}$,自动校准间隔时间为 30 min,光源读数为 10 s;2)TLD3500 线性范围为 $10\ \mu\text{Gy}\sim 1\ \text{Gy}$,在线性范围内响应的变化不大于 10%,置信区间为 0~200,低温时间为 5 s,测量时间为 20 s,低温为 140 $^{\circ}\text{C}$,测量温度为 240 $^{\circ}\text{C}$,退火温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ 。根据 γ 辐射累积剂量监

测结果和 TLD 元件布放时间得出累积剂量率。

参照《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157—2021)监测瞬时剂量率,测量时间 10 s。X- γ 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剂量率。

1.4 质量控制

为保证数据的准确性和可靠性,将质控措施分为内部质量控制及外部质量保证。

1.4.1 内部质量控制措施

委托中国科学剂量研究院每年对热释光测量系统进行检定,并出具检定证书和校准证书,剂量检验及刻度系统的线性均达到标准要求;委托中国科学剂量研究院或上海市计量测试技术研究院对 FH40G+FHZ672E-10 型 X- γ 剂量率仪进行检定,检定合格并出具检定证书。

累积剂量测量系统每月进行光源读数的测量,年终绘制光源质控图,依据拉依达准则将1年的测值控制在3倍标准差范围内^[6]⁶³;每半年进行1次热释光系统的自检和不同仪器之间的比对;滤光片清洁或加热盘更换后进行仪器稳定性和线性确认;元件更换、仪器维修等情况发生时,立即重新送检,检定合格后方可重新使用。

X- γ 剂量率仪每月进行稳定性测量,年终绘制质控图并将1年的测值控制在3倍标准差范围内;使用时需每天进行仪器状态检查和稳定性检验。

1.4.2 外部质量控制措施

参加生态环境部辐射环境监测技术中心组织的不定期环境监测项目考核,TLD监测项目和X- γ 辐射空气吸收剂量率监测项目均考核合格;参加全国辐射环境监测技能竞赛实验室测量,环境累积剂量和X- γ 辐射空气吸收剂量率结果均为满意;参加卫生系统和中国核工业集团组织的个人累积剂量系统的比对,比对结果满意。

1.5 数据分析

采用SPSS 20.0 统计分析软件进行处理与分析,通过单因素方差分析比较不同时间、不同区位对累积剂量率响应的影响。试验结果以“平均值 \pm 标准差”形式表示。

2 结果与讨论

2.1 核电厂外围辐射剂量率水平

此次对 γ 辐射累积剂量率(以下简称累积剂量率)和 γ 辐射瞬时剂量率(以下简称瞬时剂量率)监测结果的分析不考虑监测仪器(元件)对宇宙射线响应值的影响。

2018—2023年,防城港核电厂外围累积剂量率监测结果见图2(a~d)。2018—2019年在防城港核电厂外围累积剂量率测量的31个监测点中,点位31的累积剂量率最高,为141.3 nGy/h(2019年第二季度、第四季度);点位27的累积剂量率最低,为62.5 nGy/h(2018年第一季度)。不同监测点位之间的累积剂量率明显不同,这是由于累积剂量率测量受周围环境的影响较大,这与前人监测结果^[7]一致。

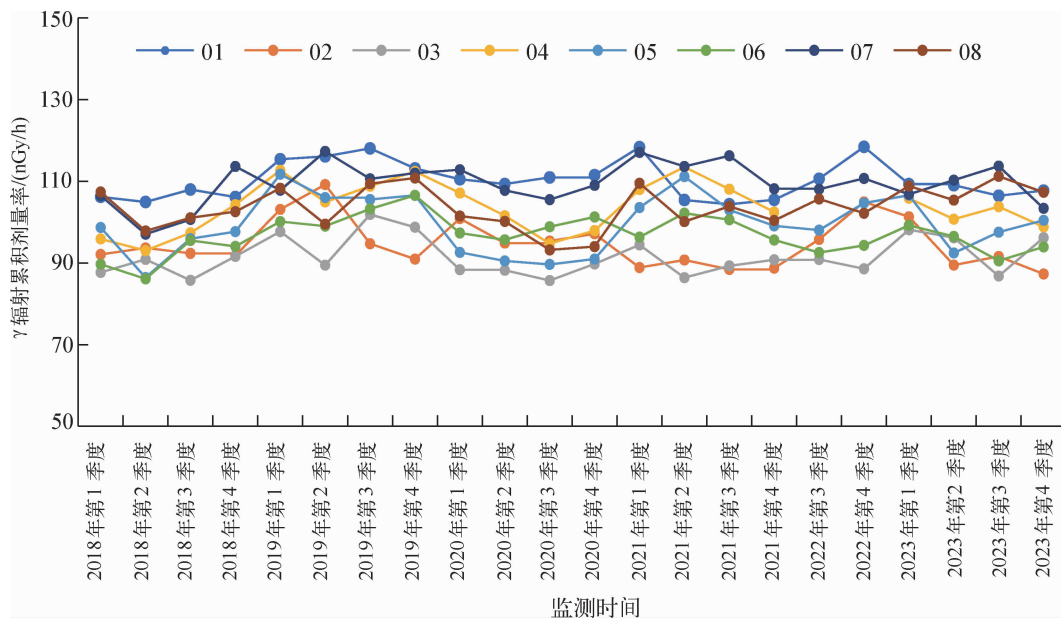


图2(a) 2018—2023年防城港市核电厂外围环境累积剂量率监测结果

Fig. 2(a) Monitoring results of cumulative dose rates around Fangchenggang nuclear power plant, 2018—2023

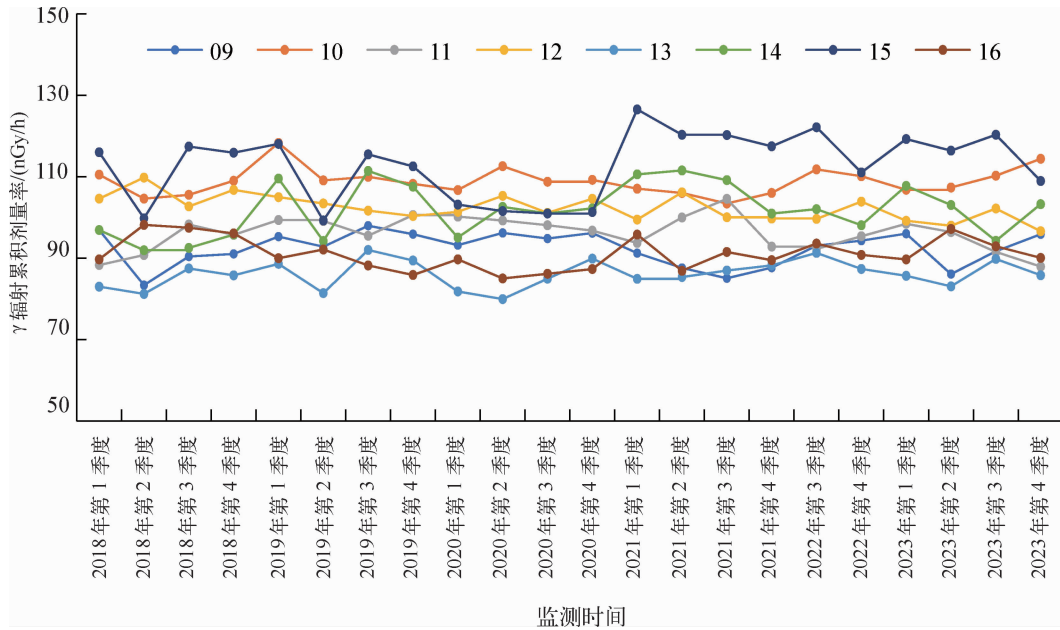


图 2(b) 2018—2023 年防城港市核电厂外围环境累积剂量率监测结果

Fig. 2(b) Monitoring results of cumulative dose rates around Fangchenggang nuclear power plant, 2018—2023

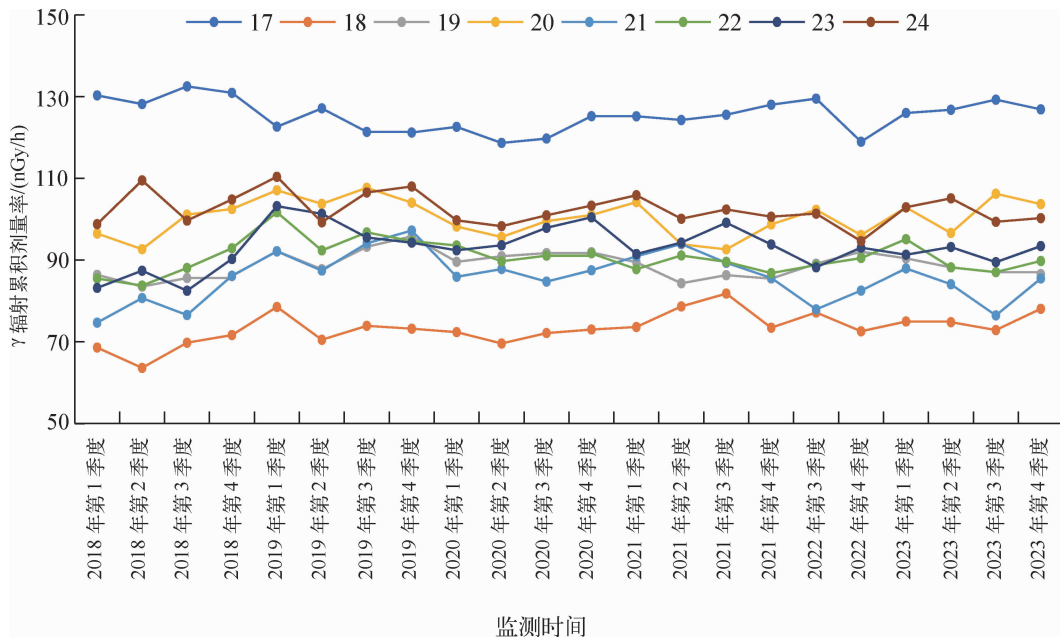


图 2(c) 2018—2023 年防城港市核电厂外围环境累积剂量率监测结果

Fig. 2(c) Monitoring results of cumulative dose rates around Fangchenggang nuclear power plant, 2018—2023

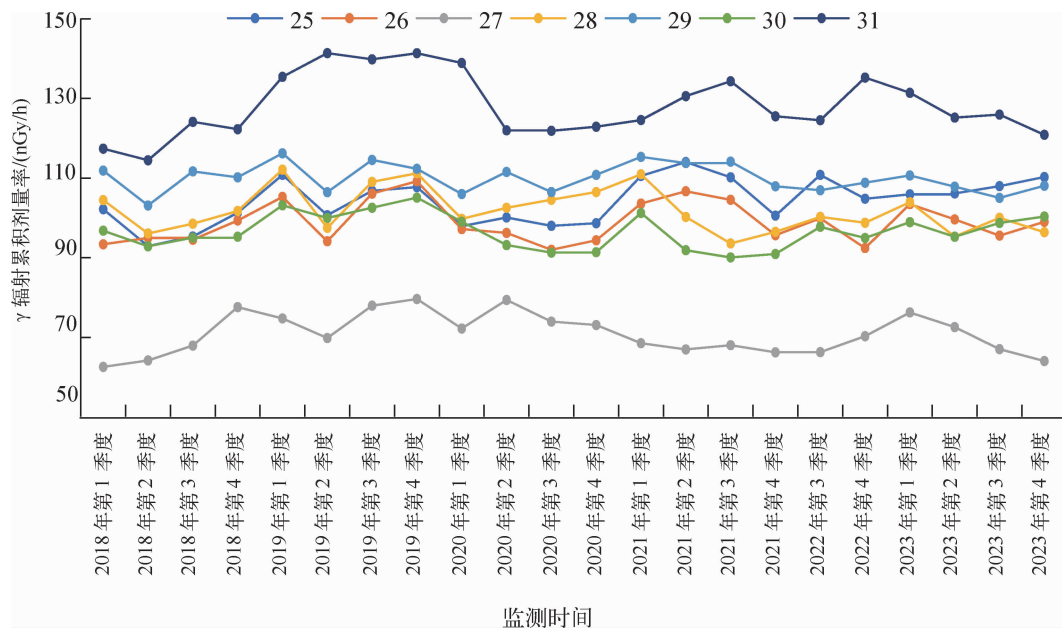


图 2(d) 2018—2023 年防城港市核电厂外围环境累积剂量率监测结果

Fig. 2(d) Monitoring results of cumulative dose rates around Fangchenggang nuclear power plant, 2018—2023

防城港核电厂外围环境累积剂量率监测值为 62.5~141.3 nGy/h,平均值为 99.1 nGy/h;标准偏差为 0.3~11.3 nGy/h,监测结果与 2016—2018 年广西防城港电厂外围环境 γ 辐射剂量率连续监测结果(监测值为 75.06~96.9 nGy/h,平均值为 85.3 nGy/h,标准偏差为 1.06~3.4 nGy/h)^{[8]75}无显著性差异。与 1989 年全国环境天然放射性水平本底调查时广西钦州地区的监测值^[9]相比,无显著性差异。对比 3 号机组运行前后防城港核电厂外围 31 个监测点的累积剂量率平均值(图 3),认为 3 号机组的商运对核电外围陆地辐射环境状况没有显著性影响。

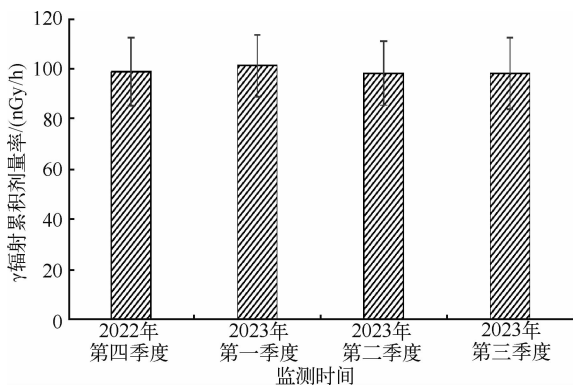


图 3 防城港核电 3 号机组运行前后累积剂量率

Fig. 3 Cumulative dose rates before and after the operation of unit 3 at Fangchenggang nuclear power plant

2.2 防城港核电厂外围累积剂量率变化分析

对 2018—2023 年防城港核电厂外围陆地环境辐射水平的年变化情况进行分析,在 $n=3, p < 0.05$ 条件下,在同列数据间采用单因素方差分析,结果见图 4,图中不同字母表示显著差异性。2018—2023 年,31 个监测点位的年平均累积剂量率监测结果分别为 96.3、102.9、97.7、99.7、98.8、98.9 nGy/h,年平均瞬时剂量率监测结果分别为 97.2、92.0、95.2、94.5、91.0、91.6 nGy/h。防城港核电厂外围瞬时剂量率与累积剂量率的监测结果均处在合理变化范围内,31 个监测点位的累积剂量率年均值相对偏差为 0.7%~7.6%,其中 2019 年的年均累积剂量率比 2018 年的年均累积剂量率升高了 6.8%;31 个监测点位的瞬时剂量率年均值相对偏差为 0.4%~6.8%,其中 2019 年瞬时剂量率比 2018 年的瞬时剂量率降低了 5.4%。

在同一点位,地表 γ 辐射随土壤中的钾、铀系及钍系的放射性核素在一定范围内变化,在“干”年比“湿”年高 15%~25%^[10]。 γ 辐射空气吸收剂量率和太阳黑子数存在反相位关系,即太阳黑子数减少,太阳磁场减弱,对来自太阳系外部宇宙射线的屏蔽能力减弱, γ 辐射空气吸收剂量率升高^{[11],[12]1099}。根据广西防城港市人民政府公布的气象数据显示,2019 年防城港降雨量较常年减少了 1~2 成,并且太阳黑子数在 2019 年也处于明

显低位^{[12]1099},这两方面可能是导致2019年的累积剂量率比2018年的累积剂量率显著增加的主要原因。

瞬时剂量率反映测量时刻的辐射水平,其受

到测量环境影响较大,本研究中瞬时剂量率的测量可能与当时测定环境相关。TLD测值反映长期的累积剂量率,更接近实际情况,在开展辐射监督性监测时,建议综合采用这2种监测方式。

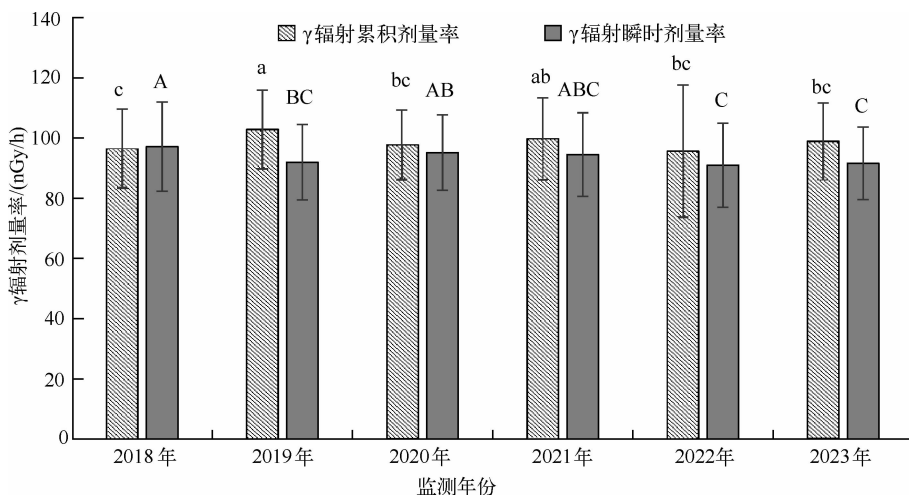


图4 2018—2023年防城港核电站外围年平均剂量率分析结果

Fig. 4 Analysis of annual average dose rates around Fangchenggang nuclear power plant, 2018—2023

由图4可知,核电外围31个监测点位的累积剂量率普遍比瞬时剂量率略高,这可能是由瞬时剂量率受环境影响较大和宇宙射线响应值未扣除导致的。

2.3 累积空气吸收剂量率变化分析

累积剂量率与瞬时剂量率监测结果受环境影响较大,但测定结果无显著性差异,其变化趋势保

持基本一致^[13-14]。采用TLD累积剂量测量与X-γ剂量率仪瞬时测量2种方法,可确保监测的可靠性。2018—2023年防城港核电外围各监测点位的空气吸收剂量率见图5。其瞬时剂量率为55.0~119.5 nGy/h,均值为93.7 nGy/h;与累积剂量率结果无较大差异,说明本监测结果可靠。

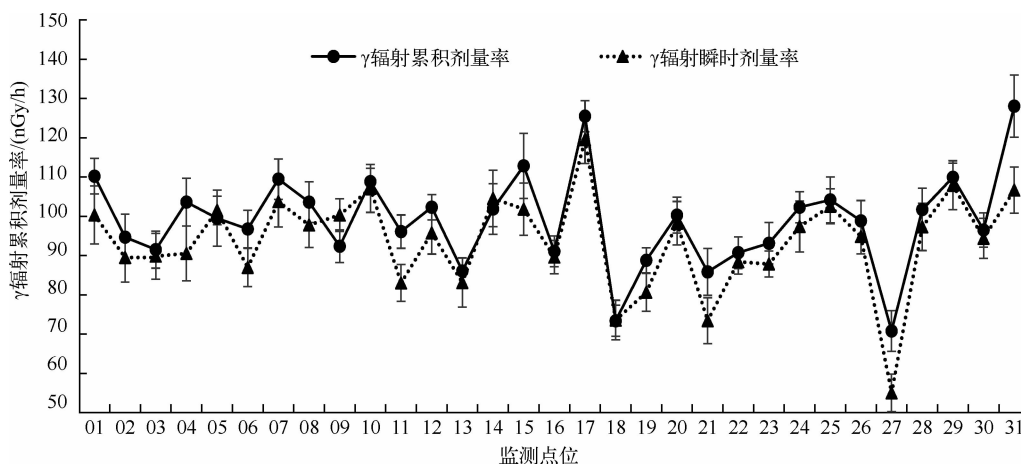


图5 2018—2023年TLD累积测量与瞬时测量剂量率对比

Fig. 5 Comparison of TLD cumulative and instantaneous dose rate measurements, 2018—2023

空气吸收剂量率受季节、降雨等自然条件变化的影响,防城港核电厂外围 γ 辐射剂量率呈现冬季偏高、夏季偏低的现象^{[8]76};降雨可改变土壤含水量,屏蔽部分地表辐射,是造成累积剂量率与该点瞬时 γ 剂量率测值差异的主要原因^[15]。

31 个监测点位累积剂量率随季节变化的情况见图 6,在 $n=3$ 、 $p<0.05$ 条件下,在同列数据间采用单因素方差分析,图中不同字母表示显著差异性。可以看出,2018 年、2019 年第二季度累

积剂量率与其第一季度相比,分别减少了 2.9% 和 4.8%;第三、第四季度与第二季度相比,呈现上升趋势,其中 2018 年第四季度的累积剂量率比第二季度升高了 6.0%,2019 年第三季度的累积剂量率比第二季度升高了 3.8%。这是由于 γ 辐射剂量率会受到风向风速、土壤含水量、氡子体浓度等多种因素影响,防城港核电所在区域全年受海洋季风性影响,导致观测结果呈现明显的季节性变化。

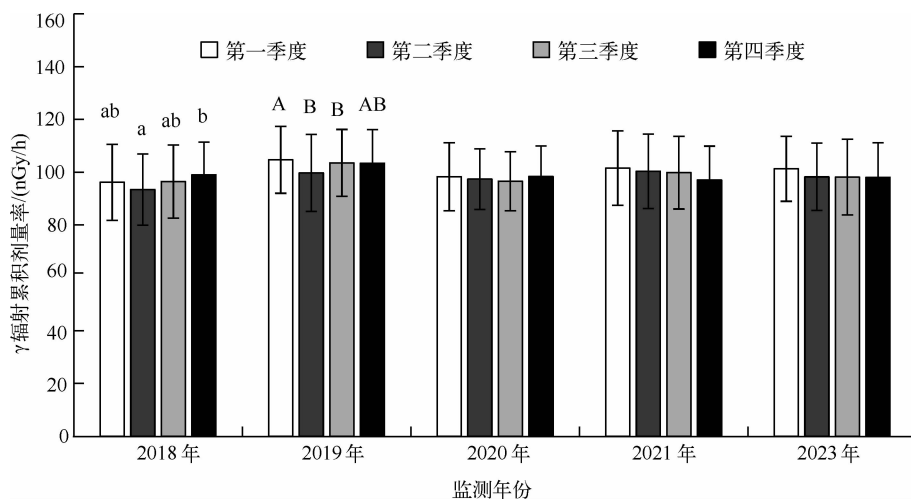


图 6 2018—2023 年各季度测量结果对比

Fig. 6 Comparison of quarterly measurement results, 2018—2023

2.4 距离对核电厂外围辐射环境的影响

2018—2023 年区位 TLD 累积测量率与瞬时剂量率比较见图 7,在 $n=3$ 、 $p<0.05$ 条件下,在同列数据间采用单因素方差分析,图中不同字母表示显著差异性。可以看出,在选取的 31 个点位中,在 $\geq 2\sim 5$ km 内的监测点位的瞬时剂量率均值和累积剂量率均值均最高,略大于 2 km 以内的测值,但均明显高于 5 km 以外的测值,初步认为这可能是由地形地貌的影响造成的。在 $\geq 2\sim 5$ km 的监测点位中,12、17、26 位于辐射环境监督性监测系统子站内的防护栏上,子站的布放数量占总布放数的 75%。在 2 km 以内的监测点位中,10、14、25 挂在子站内,子站的布放数量占总布放数的 50%。在 $\geq 5\sim 10$ km 的监测点位中,08、18、30 挂在子站内,子站的布放数量占总布放数的 30%。在 $\geq 10\sim 20$ km 的监测点位中,13、22 挂在子站内的防护栏上,子站的布放数量占总

布放数的 28%。子站 TLD 剂量计一般布防在护栏上,与挂在户外树枝上相比,离地面更近,更易接收到地面析出的氡,氡析出率和辐射空气吸收剂量率与高度呈正相关性^[16];因此在 $\geq 2\sim 5$ km 监测点位的累积剂量率和瞬时剂量率显著升高。

此外,人类社会生产实践活动也会影响地表 γ 辐射剂量率,有研究表明建筑物的 γ 空气辐射吸收剂量率水平均值高于原野的辐射水平均值^[17]。本研究中,各距离范围的累积剂量率监测结果均值均略高于瞬时剂量率监测结果均值,与单独年份瞬时剂量率均值高于累积剂量率均值的结果一致。其原因可能是累积法和瞬时法对宇宙射线的响应因子不同^[18],同一类型、不同型号的监测设备只能在扣除宇宙射线响应后,其检测结果才有可比性^[19]。此次未对宇宙射线响应值进行扣除,室外环境的辐射场波动太大、干扰因素多,瞬时剂量率不能代表长期的辐射剂量水平。

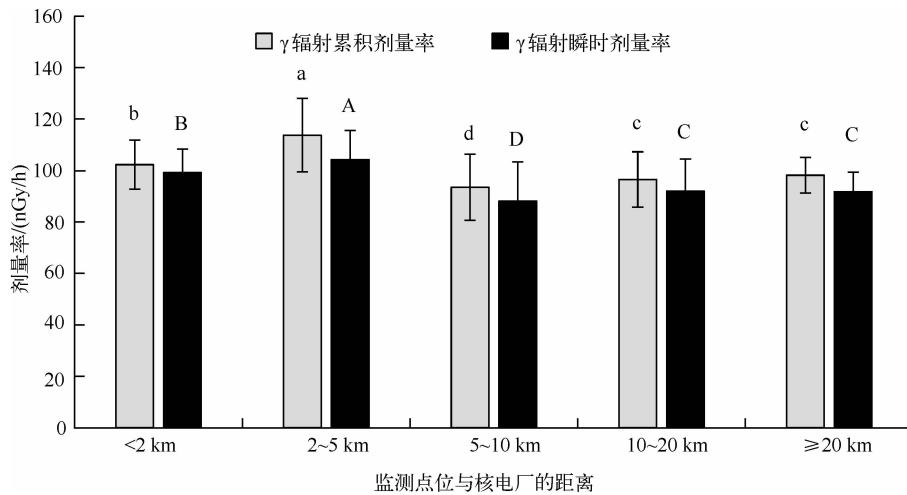


图7 2018—2023年区位TLD累积测量与瞬时测量γ剂量率对比

Fig. 7 Comparison of site-specific TLD cumulative and instantaneous γ dose rate measurements, 2018—2023

3 结论

通过 γ 辐射累积剂量率监测和 γ 辐射空气吸收剂量率瞬时监测,研究了2018—2023年核电站气态流出物的释放对防城港核电站外围陆地环境辐射水平的影响,主要结论如下:

1)防城港核电站外围31个监测点位的累积剂量率存在差异,监测值为62.5~141.3 nGy/h,平均值为99.1 nGy/h,整体上保持稳定;与历史数据对比,核电站的商运对外围陆地辐射环境状况没有产生明显影响。

2)防城港核电外围31个监测点位的年平均累积剂量率测值为95.6~102.9 nGy/h,相对偏差为0.7%~7.6%,降雨量和太阳黑子的变化导致2019年平均累积剂量率显著升高。

3)本研究采用累积剂量测量和 γ 剂量率瞬时测量两种方法,方法稳定可靠。31个监测点位的监测结果呈现一致性,累积剂量率测值普遍高于瞬时剂量率测值,可能是瞬时剂量率受环境影响较大和宇宙射线响应值未扣除导致的。此外,季节变化导致累积剂量率呈现冬季偏高、夏季偏低的现象。

4)距离对陆地 γ 剂量率没有显著影响,本研究中 $\geq 2\sim 5$ km范围内的监测点位的瞬时剂量率和累积剂量率最高,可能是由于 $\geq 2\sim 5$ km范围内的监测点位多布放于辐射环境监督性监测系统子站内,周边环境的变化导致其累积剂量率较其他点位显著升高。

参考文献:

- [1] 陈宝才,彭崇,周花珑,等.防城港核电站运行初期周围环境中 ^{90}Sr 放射性水平调查[J].中国辐射卫生,2019,28(5):575-578.
- [2] 邓飞,林清,王家玥,等.大亚湾核电基地氙的排放及其环境影响[J].环境化学,2016,35(5):956-963.
- [3] 王艳飞.福清核电运行后的环境辐射水平调查[J].海峡科学,2017(7):31-40.
- [4] 张合金.宁德核电站外围环境 γ 辐射水平监测研究[J].海峡科学,2017(1):25-26+37.
- [5] 曾广建,叶际达,马永福,等.秦山核电基地外围环境 γ 辐射水平[J].辐射防护通讯,2006(2):21-26.
- [6] 刘世和.最合理的观测次数和奇异值的拉依达舍准则研究[J].湘潭大学自然科学学报,1987(3):62-67.
- [7] 张彩虹.福建省2017—2021年环境累积剂量调查分析[J].化学工程与装备,2022(11):292-294.
- [8] 陈宝才,黄伊林,彭崇,等.广西防城港核电站外围环境 γ 辐射剂量率连续监测研究[J].广东化工,2019,46(7):74-77.
- [9] 何振芸,罗国桢,黄家矩.全国环境天然放射性水平调查研究(1983—1990年)概况[J].辐射防护,1992,12(2):81-95.
- [10] 潘自强,罗国桢.环境本底辐射测量和剂量评价[M].北京:国家环境保护局,1986.
- [11] SOLANKI S, USOSKIN I, KROMER B, et al. Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11,000 years [J]. Nature, 2004, 431(7012):1084-1087.

- [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.
- [13] 赵广翠,王毅. 北京市环境中累积剂量测量与瞬时剂量率测量比对分析[J]. 核电子学与探测技术,2015,35(4):339-341.
- [14] 张伟珠,林淑倩,孔杜娟,等. 热释光剂量计在核电站环境监测中的应用[J]. 中国辐射卫生,2022,31(3):296-300+310.
- [15] 胡晨剑,黄国夫,刘弓冶,等. 2016-2020年浙江省环境热释光剂量计累积剂量监测[J]. 辐射防护通讯,2023,43(1):27-32.
- [16] 张博,高柏,马文洁,等. 某铀矿及周边地区土壤放射性水平调查与评价[J]. 生态毒理学报,2023,18(4):369-383.
- [17] 常青,许明发,向辉云,等. 防城港市环境地表 γ 辐射剂量率调查研究[J]. 中国辐射卫生,2021,30(6):743-747+756.
- [18] 成树林. 关于热释光探测器对宇宙射线响应的研究[D]. 衡阳:南华大学,2013.
- [19] 范磊,周杨,王东霞,等. 宇宙射线响应对环境 γ 辐射空气吸收剂量率影响[J]. 核电子学与探测技术,2022,42(5):879-884.

Analysis on Radiation Levels Around Fangchenggang Nuclear Power Plant From 2018 to 2023

JIA Libo, ZHANG Wei, PENG Wenbin, CHANG Qing, XIE Tanchun, LI Weiheng,
JIANG Yue, CUI Lun, WANG Fei

(Guangxi Nuclear Radiation Environmental Supervision and Management Station, Nanning 530222, China)

Abstract: This study conducted γ -radiation cumulative dose monitoring and instantaneous monitoring of γ -radiation air absorption dose rates at 31 monitoring locations around the Fangchenggang nuclear power plant, analyzing the radiation level monitoring results to grasp the long-term changes in terrestrial radiation levels around the nuclear power plant. The results show that from 2018 to 2023, the environmental γ -radiation cumulative dose rate monitoring values around the Fangchenggang nuclear power plant ranged from 62.5 to 141.3 nGy/h, with an average value of 99.1 nGy/h; the instantaneous dose rates ranged from 55.0 to 119.5 nGy/h, with an average value of 93.7 nGy/h. The terrestrial environmental radiation levels around the plant remained consistent before and after the commercial operation of its three units, with both γ -radiation cumulative dose rates and instantaneous dose rates maintained at normal levels, indicating that the emission of airborne effluents during the operation of the nuclear power did not impact the radiation levels in the surrounding environment. There was significant variation in the γ -radiation cumulative dose rates at different monitoring points, with a tendency for higher levels in winter and lower in summer, suggesting that γ -radiation cumulative dose rates are greatly influenced by environmental factors.

Key words: cumulative dose rate; instantaneous dose rate; nuclear power plant; radiation level; airborne effluents; environmental factors