

# 阳江核电厂外围环境气溶胶总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性水平

甄丽颖 张家俊

(广东省环境辐射监测中心 广州 510305)

**摘要** 核电厂周围环境气溶胶的总放射性水平是一项重点关注项目。为掌握阳江核电周围环境气溶胶中总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性水平及变化趋势,自2014年1月,对阳江核电厂5 km范围内大澳和允泊的气溶胶总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 进行为期三年的采样监测,获得该核电厂5 km范围内气溶胶总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度范围分别为0.01–0.35 mBq·m<sup>-3</sup>、0.05–2.46 mBq·m<sup>-3</sup>,年均值分别为0.07 mBq·m<sup>-3</sup>、0.65 mBq·m<sup>-3</sup>。受降雨影响,总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性变化有明显的季节特征,总体呈现冬春季高、夏秋季低的特点。监测结果与对照点和本底调查进行比较,总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 活度浓度没有明显变化,初步判断阳江核电厂运行安全。

**关键词** 气溶胶, 总 $\alpha$ , 总 $\beta$ , 阳江核电

**中图分类号** TL12

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.080301

## Total $\alpha$ and total $\beta$ radioactivity level in atmospheric aerosol around Yangjiang nuclear power plant

ZHEN Liying ZHANG Jiajun

(Guangdong Environment Radiation Monitoring Centre, Guangzhou 510305, China)

**Abstract Background:** As an important content of radiation environmental monitoring in nuclear power plant, the atmospheric aerosol radioactive level has attracted much attention. **Purpose:** This study aims to find out variation regularity and affecting factors of total  $\alpha$  and total  $\beta$  in atmospheric aerosol 5 km around the Yangjiang nuclear power plant. **Methods:** Radioactivity concentrations of total  $\alpha$  and total  $\beta$  in the atmosphere aerosol of Daao village and Yunbo village monitoring stations were collected by a large flowrate data sampling instrument using particle trapping cellulose filter paper with more than 95% high efficiency, and measured using low background  $\alpha/\beta$  measuring device in the date range from January 2014 to December 2016. **Results:** The concentration ranges of total  $\alpha$  and total  $\beta$  were 0.01–0.35 mBq·m<sup>-3</sup> and 0.05–2.46 mBq·m<sup>-3</sup> respectively. The annual average concentrations were 0.07 mBq·m<sup>-3</sup> and 0.65 mBq·m<sup>-3</sup>. The radioactivity concentrations of total  $\alpha$  and total  $\beta$  reflected obvious seasonal variation-all of the maximum monitoring data occurred in the winter due to the influence of the rainfall. **Conclusion:** Results indicate that there is no significant change of total  $\alpha$  and total  $\beta$  in the atmosphere aerosol samples and the operation of the Yangjiang nuclear power plant is safe.

**Key words** Atmospheric aerosol, Total  $\alpha$ , Total  $\beta$ , Yangjiang nuclear power plant

阳江核电厂是中广核集团在广东地区的第二核电基地。阳江核电厂的运行对周围环境是否有放射性环境影响,不仅是政府审管部门重点关注的内容,也是核电周围广大公众最关心的问题。按照我国

家环境保护部要求,根据《辐射环境监测技术规范》(HJ/T61-2001)<sup>[1]</sup>的相关规定,广东省环境辐射监测中心(Guangdong Environment Radiation Monitoring Centre, GEREC)以阳江核电厂为中心周围50 km范围

第一作者:甄丽颖,女,1984年出生,2011年于东北电力大学获硕士学位,现从事放射分析和辐射环境监测工作,助理工程师,应用化学专业  
收稿日期:2017-03-17,修回日期:2017-04-27

First author: ZHEN Liying, female, born in 1984, graduated from Northeast Electric Power University with a master's degree in 2011, engaged in radiochemical analysis and radiation environmental monitoring, assistant engineer, major in applied chemistry

Received date: 2017-03-17, accepted date: 2017-04-27

内设置监测点, 对该核电厂外围环境辐射水平及气液态流出物进行有计划的监督性监测。监测项目包括: 环境  $\gamma$  辐射水平; 气溶胶的总  $\alpha$ 、总  $\beta$  分析和  $\gamma$  谱分析; 水体的  $^3\text{H}$ 、 $\gamma$  谱和  $^{90}\text{Sr}$  分析; 土壤的  $^{90}\text{Sr}$  和  $\gamma$  谱分析; 指示生物的  $^{90}\text{Sr}$ 、 $\gamma$  谱、 $^3\text{H}$  和  $^{14}\text{C}$  分析; 气液态流出物的  $\gamma$  谱和  $^3\text{H}$  分析等。

环境介质中总  $\alpha$ 、总  $\beta$  放射性测量是目前环境放射性监测的手段之一, 对大量放射性监测样品能起到快速筛选作用<sup>[2]</sup>。气载放射性物质是核电厂放射性排放的一个重要途径, 也是评价核电厂对周围环境影响必须考虑的重要因素。近年来, 核电厂周围环境气溶胶的总  $\alpha$ 、总  $\beta$  放射水平监测一直备受关注, 陈彬等<sup>[3]</sup>早些年对秦山核电周围环境气溶胶总放射性水平的监测进行过初步的分析和探讨。本文以阳江核电厂 5 km 范围内两个主要监测点所获得的气溶胶总  $\alpha$ 、总  $\beta$  监测结果进行数据统计, 对其变化趋势和规律进行分析总结, 为阳江核电厂长期安全运行和公众关注的环境影响提供了动态评价依据。

## 1 监测方法

### 1.1 监测范围及布点

依据《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249-2011)<sup>[4]</sup>, 综合考虑核电厂流出物的排放特点和核电厂周围环境状况, 以核电厂 5 km 范围内地面最高浓度处和主导风向向下风向的大澳(E: 112°14'43.1", N: 21°42'32.0") 以及 允泊 (E: 112°15'10.1", N: 21°43'28.4") 为气溶胶监测点。对照点设在最小风频下风向距该核电厂 36 km 的粤西分部, 为规范管理大亚湾核电和阳江核电的对照点, 后将对照点改设为距阳江核电厂 330 km 外的广东省河源市。

### 1.2 采样与测量仪器

#### 1.2.1 采样器

气溶胶采集采用 HH02-LS120 型大流量采样器 (北京华瑞核安科技有限公司)。过滤材料选用直径 0.3  $\mu\text{m}$ 、粒子捕集效率 95% 以上的纤维素滤纸, 滤纸尺寸为 21 cm×27 cm。

#### 1.2.2 测量仪器

气溶胶测量仪器为 MPC9604 低本底  $\alpha/\beta$  测量仪 (美国 ORTEX 公司)。该仪器主要性能指标见表 1。

## 1.3 质量保证

质量保证通过全面控制监测过程的组织管理、参与人员素质要求与培训、分析过程的质量控制等, 确保测量结果的代表性、准确性和可靠性, 并对测量装置进行定期维护和稳定性检验。

### 1) $\chi^2$ 检验

对测量装置每年或检修后均进行一次泊松分布检验。

### 2) 长期稳定性检验

对测量装置定期 (约 15 d) 进行一次本底测量和效率检验, 以确定测量装置的长期稳定性。并依据检验结果绘制本底质控图和效率质控图。

### 3) 检定

严格按照计量认证的要求每两年进行仪器检定。

表 1 MPC 9604 低本底  $\alpha/\beta$  测量仪性能指标  
Table 1 Specifications of MPC 9604 low background  $\alpha/\beta$  counting instrument.

| 项目<br>Items                  | 相对效率<br>Relative efficiency / % | 本底<br>Background / count·min <sup>-1</sup> | 探测限<br>Detection limit / 10 <sup>-3</sup> mBq·m <sup>-3</sup> |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 总 $\alpha$<br>Total $\alpha$ | 2.1                             | 0.06                                       | 7.84                                                          |
| 总 $\beta$<br>Total $\beta$   | 47                              | 0.65                                       | 1.26                                                          |

## 2 采样与测量

### 2.1 采样

采样时段为 2014 年 1 月–2016 年 12 月, 采样频次为每月一次。每月连续采样 5 d, 采样器流速为 2 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>, 标况累计采样体积为 10 000 m<sup>3</sup>。

### 2.2 制样与测量

采集样品后, 取出滤膜 (采样前恒重、称重), 置于干燥器, 恒重、称重后, 送  $\gamma$  谱测量。 $\gamma$  谱测量后, 将样品在马弗炉内 450 °C 灼烧 1 h, 使滤膜灰化。灰样恒重、称重, 铺样, 放置一个月 (距采样时间) 后进行总放水平的测量, 测量时间 1 000 min。

## 3 监测结果与分析

### 3.1 气溶胶总 $\alpha$ 放射性监测结果

通过对气溶胶的采样和测量, 获得了 2014 年 1 月–2016 年 12 月期间, 大澳、允泊和对照点环境气溶胶中总  $\alpha$  放射性水平, 监测结果见表 2。由表 2

可知，阳江核电 5 km 范围内两个监测点位的气溶胶总  $\alpha$  放射性浓度范围为 0.01–0.35  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，大澳、允泊气溶胶总  $\alpha$  放射性活度浓度三年内总均值为 0.07  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，略低于对照点总均值 0.10  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。大澳气溶胶总  $\alpha$  放射性年均值为 0.06  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.05  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.09  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，允泊气溶胶总  $\alpha$  放射性年均值为 0.09  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.06  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.09  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，均略低于对照点气溶胶总  $\alpha$  放射性年均值的 0.10  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.11  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、

0.11  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。自 2014 年 1 月起，大澳、允泊的气溶胶总  $\alpha$  放射水平未出现明显升高，变化趋势同对照点相似。

大澳和允泊气溶胶总  $\alpha$  放射水平与对照点基本处于同一水平，年均值略低于对照点，除考虑取样和测量环节的误差外，应主要受监测点位周围环境和气象条件影响。大澳、允泊监测点位于滨海位置，与对照点所处位置比较，周围居民活动相对较少，扬尘相对较少。

表 2 气溶胶总  $\alpha$  监测结果  
Table 2 Measured results of the total  $\alpha$  in aerosol samples.

| 点位<br>Sites            | 时间<br>Time | 放射性活度浓度 Radioactivity concentration / $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
|------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                        |            | 1 月<br>Jan.                                                          | 2 月<br>Feb. | 3 月<br>Mar. | 4 月<br>Apr. | 5 月<br>May | 6 月<br>Jun. | 7 月<br>Jul. | 8 月<br>Aug. | 9 月<br>Sep. | 10 月<br>Oct. | 11 月<br>Nov. | 12 月<br>Dec. | 均值<br>Average |
| 大澳<br>Daao             | 2014       | 0.07                                                                 | 0.03        | 0.06        | 0.04        | 0.01       | 0.02        | 0.01        | 0.01        | 0.02        | 0.14         | 0.07         | 0.19         | 0.06          |
|                        | 2015       | 0.06                                                                 | 0.08        | 0.02        | 0.02        | 0.01       | 0.04        | 0.05        | 0.02        | 0.03        | 0.08         | 0.12         | 0.07         | 0.05          |
|                        | 2016       | 0.12                                                                 | 0.09        | 0.18        | 0.02        | 0.04       | 0.01        | 0.02        | 0.02        | 0.01        | 0.11         | 0.18         | 0.28         | 0.09          |
| 允泊<br>Yunbo            | 2014       | 0.09                                                                 | 0.02        | 0.21        | 0.06        | 0.01       | 0.06        | 0.05        | 0.02        | 0.02        | 0.19         | 0.09         | 0.27         | 0.09          |
|                        | 2015       | 0.06                                                                 | 0.11        | 0.04        | 0.04        | 0.01       | 0.02        | 0.07        | 0.07        | 0.06        | 0.06         | 0.15         | 0.07         | 0.06          |
|                        | 2016       | 0.08                                                                 | 0.13        | 0.11        | 0.04        | 0.04       | 0.02        | 0.04        | 0.03        | 0.02        | 0.11         | 0.16         | 0.35         | 0.09          |
| 样品数 Numbers            |            | 72                                                                   |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 测量范围 Scope             |            | 0.01–0.35                                                            |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 三年均值 Average           |            | 0.07                                                                 |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 对照点<br>Control<br>site | 2014       | 0.14                                                                 | 0.03        | 0.13        | 0.06        | 0.03       | 0.03        | 0.05        | 0.05        | 0.04        | 0.21         | 0.08         | 0.29         | 0.10          |
|                        | 2015       | 0.11                                                                 | 0.20        | 0.05        | 0.06        | 0.03       | 0.05        | 0.13        | 0.11        | 0.10        | 0.12         | 0.26         | 0.09         | 0.11          |
|                        | 2016       | 0.13                                                                 | 0.07        | 0.32        | 0.12        | 0.09       | 0.08        | 0.06        | 0.08        | 0.06        | 0.09         | 0.08         | 0.12         | 0.11          |
| 样品数 Numbers            |            | 36                                                                   |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 测量范围 Scope             |            | 0.03–0.32                                                            |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 三年均值 Average           |            | 0.10                                                                 |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |

3.2 气溶胶总  $\beta$  放射性监测结果

大澳、允泊和对照点环境气溶胶中总  $\beta$  放射性水平监测结果见表 3。由表 3 可知，阳江核电 5 km 范围内两个监测点位的气溶胶总  $\beta$  放射性浓度范围为 0.05–2.46  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，三年均值为 0.65  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。大澳气溶胶总  $\beta$  放射性年均值为 0.61  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.57  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.73  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，允泊气溶胶总  $\beta$  放射性年均值为 0.65  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.53  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.78  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，均略低于对照点气溶胶总  $\beta$  放射性年均值的 0.82  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、0.75  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 、1.05  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。两监测点位总  $\beta$  放射性年均值与对

照点的差异应主要受点位周围环境和气象条件的影响。

自 2014 年 1 月起，大澳、允泊气溶胶总  $\beta$  放射水平未出现明显升高。《阳江核电工程首次装料前环境辐射本底调查报告》<sup>[5]</sup>显示，2009 年 11 月–2011 年 11 月本底调查期间，阳江核电厂 5 km 范围内的大澳、气象塔、核电生活区气溶胶中总  $\beta$  放射性浓度范围为 0.03–3.00  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ，三个监测点总平均值为 1.06  $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2014–2016 年间大澳和允泊两个监测点位气溶胶中总  $\beta$  放射性水平与本底调查值进行比较，没有明显变化。

表 3 气溶胶总  $\beta$  监测结果  
Table 3 Measured results of the total  $\beta$  in aerosol samples.

| 点位<br>Sites          | 时间<br>Time | 放射性活度浓度 Radioactivity concentration / $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
|----------------------|------------|----------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|                      |            | 1 月<br>Jan.                                                          | 2 月<br>Feb. | 3 月<br>Mar. | 4 月<br>Apr. | 5 月<br>May | 6 月<br>Jun. | 7 月<br>Jul. | 8 月<br>Aug. | 9 月<br>Sep. | 10 月<br>Oct. | 11 月<br>Nov. | 12 月<br>Dec. | 均值<br>Average |
| 大澳<br>Daao           | 2014       | 1.32                                                                 | 0.56        | 0.70        | 0.50        | 0.10       | 0.18        | 0.19        | 0.11        | 0.11        | 0.92         | 1.15         | 1.50         | 0.61          |
|                      | 2015       | 0.74                                                                 | 1.19        | 0.39        | 0.35        | 0.17       | 0.08        | 0.33        | 0.46        | 0.60        | 1.14         | 0.72         | 0.69         | 0.57          |
|                      | 2016       | 1.02                                                                 | 1.33        | 0.90        | 0.15        | 0.47       | 0.28        | 0.16        | 0.43        | 0.05        | 0.79         | 0.77         | 2.42         | 0.73          |
| 允泊<br>Yunbo          | 2014       | 1.38                                                                 | 0.47        | 0.75        | 0.48        | 0.11       | 0.27        | 0.24        | 0.24        | 0.12        | 1.14         | 1.04         | 1.53         | 0.65          |
|                      | 2015       | 0.70                                                                 | 1.28        | 0.29        | 0.46        | 0.15       | 0.13        | 0.42        | 0.55        | 0.62        | 0.55         | 0.50         | 0.73         | 0.53          |
|                      | 2016       | 0.81                                                                 | 1.58        | 0.82        | 0.84        | 0.29       | 0.29        | 0.18        | 0.48        | 0.05        | 0.78         | 0.78         | 2.46         | 0.78          |
| 样品数 Numbers          |            | 72                                                                   |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 测量范围 Scope           |            | 0.05–2.46                                                            |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 三年均值 Average         |            | 0.65                                                                 |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 对照点<br>Control sites | 2014       | 1.96                                                                 | 0.62        | 1.30        | 0.59        | 0.21       | 0.25        | 0.37        | 0.26        | 0.17        | 1.05         | 1.33         | 1.71         | 0.82          |
|                      | 2015       | 0.76                                                                 | 1.83        | 0.67        | 0.41        | 0.23       | 0.17        | 0.73        | 0.81        | 0.63        | 0.86         | 1.11         | 0.83         | 0.75          |
|                      | 2016       | 1.16                                                                 | 1.97        | 1.94        | 0.82        | 0.84       | 0.58        | 0.51        | 0.55        | 0.95        | 0.82         | 0.88         | 1.55         | 1.05          |
| 样品数 Numbers          |            | 36                                                                   |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 测量范围 Scope           |            | 0.15–1.97                                                            |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |
| 三年均值 Average         |            | 0.87                                                                 |             |             |             |            |             |             |             |             |              |              |              |               |

### 3.3 气溶胶总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性水平季度变化特征

2014 年 1 月–2016 年 12 月期间, 大澳和允泊监测点气溶胶总  $\alpha$ 、总  $\beta$  活度浓度的季度平均值见表 4。由表 4 可知, 大澳、允泊气溶胶总  $\alpha$ 、总  $\beta$

活度浓度随季节变化明显, 冬季和春季要比夏季和秋季的含量高。其中总  $\alpha$ 、总  $\beta$  活度浓度的季度最高值出现在冬季。

表 4 气溶胶总  $\alpha$ 、总  $\beta$  活度浓度的季度平均值  
Table 4 Quarterly average values of total  $\alpha$  and total  $\beta$ .

| 项目 Items                  | 点位 Site  | 放射性活度浓度 Radioactivity concentration / $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ |                                 |                                   |                                   |
|---------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                           |          | 春季 (2–4 月)<br>Spring (Feb.–Apr.)                                     | 夏季 (5–7 月)<br>Summer (May–Jul.) | 秋季 (8–10 月)<br>Autumn (Aug.–Oct.) | 冬季 (11–1 月)<br>Winter (Nov.–Jan.) |
| 总 $\alpha$ Total $\alpha$ | 大澳 Daao  | 0.06                                                                 | 0.02                            | 0.05                              | 0.13                              |
|                           | 允泊 Yunbo | 0.09                                                                 | 0.04                            | 0.06                              | 0.15                              |
| 总 $\beta$ Total $\beta$   | 大澳 Daao  | 0.67                                                                 | 0.22                            | 0.51                              | 1.15                              |
|                           | 允泊 Yunbo | 0.77                                                                 | 0.23                            | 0.50                              | 1.10                              |

### 3.4 气溶胶总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性水平与降雨的关系探讨

结合 2014–2016 年间大澳和允泊监测点获取的降雨量信息, 考察降雨量与气溶胶总  $\alpha$ 、总  $\beta$  放射性水平的关系。该核电厂周围环境气溶胶总  $\alpha$ 、总  $\beta$  放射水平与降雨量呈一定的负相关性, 当降雨量大时总  $\alpha$ 、总  $\beta$  放射性水平偏低, 降雨量少时总放射性水平偏高。覃连敬等<sup>[6]</sup>曾就气溶胶放射性水平与气象条件等因素的相关性做过深入的分析和探

讨。大澳和允泊气溶胶每月总  $\alpha$ 、总  $\beta$  活度浓度均值与降雨量的关系见图 1。

阳江核电所处阳江地区属亚热带海洋季风气候, 全年高温, 降水集中分布在夏季, 冬季降水量少。通过与降雨量的数据分析, 初步认证阳江核电厂 5 km 范围内环境气溶胶总  $\alpha$ 、总  $\beta$  放射水平春冬季高, 夏秋季低, 其中冬季为最高的变化趋势主要受该地区降雨量等气象因素的影响。

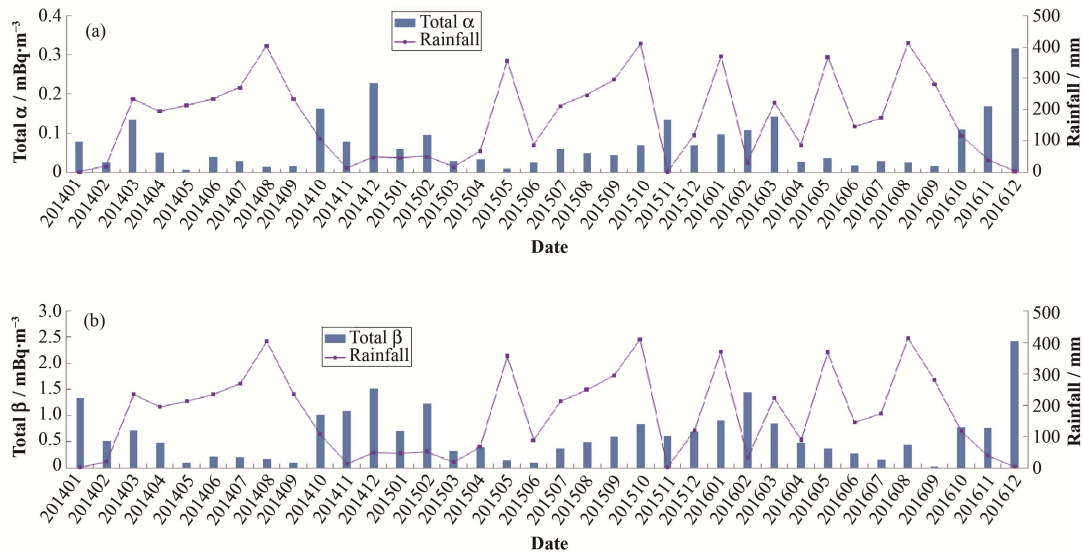


图1 气溶胶总 $\alpha$  (a)、总 $\beta$  (b)浓度与雨量关系  
Fig.1 Relationship between total  $\alpha$  (a), total  $\beta$  (b) and rainfall.

#### 4 结语

自2014年3月–2016年1月,阳江核电1–3号机组相继投入商业运行并经过4次机组大修,阳江核电已运行三年。从目前的监测结果可初步判断阳江核电厂运行安全,对周围环境的辐射影响满足国家环保要求。为客观而真实验证和评价核电厂安全运行和排放管理状况,为国家环保部门提供客观、准确的评估资料和依据,对于核电厂的监督性监测应长期、有计划地开展下去。确保核电厂运行对周围环境和公众的影响符合国家法规标准的要求。

#### 参考文献

- 1 HJ/T61-2001: 辐射环境监测技术规范[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2001.  
HJ/T61-2001: Technical criteria for radiation environmental monitoring[S]. Beijing: General Administration of Environmental Protection of China, 2001.
- 2 潘自强. 电离辐射环境监测与评价[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 296.  
PAN Ziqiang. Ionizing radiation environmental monitoring and evaluation[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007: 296.
- 3 陈彬, 叶际达, 吴晓飞, 等. 秦山核电基地外围环境气溶胶总 $\alpha$ 、总 $\beta$ 放射性水平监测[J]. 辐射防护通讯,

2006, 26(5): 31–35.

CHEN Bin, YE Jida, WU Xiaofei, *et al.* Monitoring of gross  $\alpha$  and gross  $\beta$  radioactivity levels in environmental aerosol around QNPPs[J]. Radiation Protection Bulletin, 2006, 26(5): 31–35.

- 4 GB 6249-2011: 核动力厂环境辐射防护规定[S]. 北京: 环境保护部/国家质量监督检验检疫总局, 2011.  
GB 6249-2011: Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plants[S]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China/ General Administration of Quality Supervision and Quarantine of the People's Republic of China, 2011.
- 5 阳江核电工程首次装料前环境辐射本底调查报告[R]. 广州: 广东省环境辐射监测中心, 2012: 208–213.  
The radiation environment background survey report before the first loading of Yangjiang nuclear power plant[R]. Guangzhou: Guangdong Environment Radiation Monitoring Centre, 2012: 208–213.
- 6 覃连敬, 李美丽, 蒋岚, 等. 广州地区大气环境气溶胶样品放射性特征[J]. 核技术, 2016, 39(9): 090501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.090501.  
QIN Lianjing, LI Meili, JIANG Lan, *et al.* Radioactivity characteristics of atmospheric aerosol samples in Guangzhou[J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(9): 090501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.090501.