

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.008

• 辐射监测/论著 •

不同 γ 辐射剂量率仪空气吸收剂量率测量比对分析

曹龙生, 丁逊, 杨阳, 曾磊, 胡晨剑, 吕安标, 廖宇航

浙江省辐射环境监测站, 国家环境保护辐射环境监测重点实验室,

浙江省辐射环境安全监测重点实验室, 浙江 杭州 310012

摘要: **目的** 为检验和提升全省辐射环境监测网络监测技术水平和能力, 确保监测数据和信息的准确可靠, 获取本年度仪器设备的宇宙射线响应值。**方法** 2018 年 9 月, 浙江省辐射环境监测站在宁波组织开展了全省辐射环境监测网络 γ 辐射空气吸收剂量率测量比对, 共有 15 家单位的 33 台仪器设备参与了 5 个监测点位的比对测量, 所有比对结果采用 Z 比分数值进行评价。**结果** 所有测量结果的 $|Z| \leq 2$, 评价结果为满意, 可以接受。**结论** 闪烁计数器测量数据的离散性较大, 高压电离室对宇宙射线响应值较大, 除宇宙射线响应测点外, 两类仪器的测量结果保持着较好的线性。**关键词:** γ 辐射空气吸收剂量率; 宇宙射线响应; 比对

中图分类号: R144.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)02-0159-06

Comparative analysis of air absorbed dose rate with different gamma radiation dose rate instrument

CAO Longsheng, DIN Xun, YANG Yang, ZENG Lei, HU Chenjian, LVU Anbiao, LIAO Yuhang

Zhe Jiang Province Environmental Radiation Monitoring Center, State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Radiation Monitoring, Zhe Jiang Province Key Laboratory of Environmental Radiation Safety Monitoring, Hangzhou 310012 China

Abstract: **Objective** In order to test and improve the monitoring technical level and ability of radiation environmental monitoring network in Zhejiang Province, ensure the accuracy and reliability of monitoring data and information, and obtain the cosmic ray response values of instruments and equipment in this year. **Methods** In September 2018, an intercomparison meeting of environmental gamma radiation air absorbed dose rate within the radiation environmental monitoring network of Zhejiang province was held in Ningbo, which was organized by Zhejiang Province Radiation Environmental Monitoring Center. A total of 33 sets of instruments from 15 member units participated in the intercomparison measurements at 5 environmental measuring points, and the comparison results were evaluated by the Z score values. **Results** It was found that the $|Z|$ of all measurement results were less than or equal to 2, and the evaluation results were satisfactory and acceptable. **Conclusion** The measured data of scintillation counters have relatively wider dispersion, and the high pressure ionization chambers have bigger response value to cosmic ray. The measurement results of the two kinds of instruments keep a good linearity except for the measurement points of cosmic ray response.

Keywords: γ Radiation Air Absorbed Dose Rate; Cosmic Ray Response; Intercomparison

在正常本底环境中, 宇宙射线是环境天然辐射的主要组成部分, 约占天然本底辐射外照射剂量率的 40%, 随着地表海拔高度增加, 宇宙射线对外照射的贡献也持续增加。 γ 外照射测量仪表对宇宙射线的响应存在较大差异, 因此在进行 γ 辐射剂量率测量时有必要扣除测量仪表对宇宙射线的响应部分, 以尽可能降低测量误差, 使各监测数据有可比性^[1-4]。

为不断提升全省辐射环境监测网络监测技术水

平和能力, 确保省网监测数据和信息的准确可靠, 根据 2018 年全省辐射环境监测任务的要求, 浙江省辐射环境监测站于 2018 年 9 月 4—6 日在宁波组织开展了全省辐射环境监测网络 γ 辐射剂量率和宇宙射线响应测量比对工作。全省各地市环境监测(中心)站, 以及特邀单位中核核电运行管理有限公司、三门核电有限公司和浙江国辐环保科技有限公司等 15 家单位参加了此次比对。

基金项目: 浙江省生态环境厅环保科研课题 (2019A017)

作者简介: 曹龙生 (1987—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 辐射监测, E-mail: 525467701@qq.com

1 材料与方法

1.1 监测点位 各单位辐射监测技术人员使用不同类型的 γ 辐射剂量率仪分别在不同类型的环境中, 在同一时间、同一监测点位进行测量和比较。按照《环境地表 γ 辐射剂量率测定规范》^[5], 选取了 5 个监测点

位, 其中宇宙射线响应监测点位^[6-8]1 个, 原野监测点位 1 个, 道路监测点位 1 个, 室内监测点位 1 个, 高剂量率监测点位 1 个(室内测点加源情况), 室外测量点位选择距离高大建筑物 30 m 以上, 地势平坦、开阔、无积水的地表上^[9], 详见表 1。

表 1 监测点位基本情况

Table 1 The basic situation of measuring points

点位名称	地点	经纬度	备注
宇宙射线响应测点	宁波东钱湖湖面	N29°44'47"E 121°39'08"	监测所用船只只供游客观光乘坐的玻璃钢船, 距离岸边 > 1 km, 水深 > 3 m
原野测点	东钱湖周边田野	N29°45'54"E 121°38'24"	一片长草荒地, 测点周围空旷
道路测点	东钱湖周边柏油路面	N29°44'43"E 121°37'31"	道路周围无高大建筑和树木
室内测点	宁波市新金星宾馆	N29°52'10"E 121°31'15"	海曙区柳汀街555号三楼会议室(明月厅), 其地面为水泥地, 测点离地 1 m
高剂量测点	宁波市新金星宾馆	N29°52'10"E 121°31'15"	室内测点加 ⁶⁰ Co点源, 活度: 90 kBq (参考日期2017年11月1日), 置于带不锈钢圆盘的木质三脚架上, 离地 1 m, 测点离源 0.5 m

1.2 参加比对单位 参加本次比对的单位有: 浙江省辐射环境监测站、全省各地市环境监测(中心)站、义乌市环境保护监测站、以及特邀单位中核核电运行管理有限公司、三门核电有限公司和浙江国辐环保科

技有限公司等 15 家单位。

1.3 测量仪器 参加本次比对的仪器共计为 33 台, 均在检定有效期内, 分属 3 种不同类型, 基本情况见表 2。

表 2 参加比对仪器的基本情况

Table 2 The basic situation of instruments participated in the intercomparison measurements

仪器编号	探测器类型	仪器型号	数量	量程范围	能量响应范围	其他参数
1	塑料闪烁体 + NaI(Tl)	FH40G + FHZ672E-10	22	1 nSv/h ~ 100 μ Sv/h	48 keV ~ 6 MeV	塑料闪烁体体积: 圆柱体 $\Phi 90$ mm \times 90 mm, 前端NaI(Tl)提高150 keV以下的灵敏度灵敏度: 2000 cps/ μ Sv \cdot h ⁻¹ 角响应: 0° ~ 45°, 极限偏差 \pm 15%
2	高压电离室	RSS-131ER/RS Detection	10	量程1: 0 ~ 0.1 R/h 量程2: 0 ~ 110 R/h 量程3: 0 ~ 100 R/h	60 keV ~ 10 MeV	探测器大小: 不锈钢球体外径254 mm, 内径51 mm, 内充25个大气压Ar气体极限偏差: \pm 5%(10 μ R/h)角响应: < 2%
3	塑料闪烁体	6150AD-b	1	1 nSv/h ~ 99.9 μ Sv/h	20 keV ~ 7 MeV	探测器大小: 圆柱体 $\Phi 76$ mm \times 76 mm 角响应: 0° ~ 60°, 极限偏差 \pm 40%

1.4 计算方法 比对结果以所测点位的 γ 辐射空气吸收剂量率为最终结果, 原始数据通过下述方法计算最终结果。

$$D_{\text{宇}} = K_1 K_2 R_{\text{水}} \quad 1)$$

$$D = K_1 K_2 R_{\text{陆}} - K_3 D_{\text{宇}} \quad 2)$$

式中 $D_{\text{宇}}$ —宇宙射线响应测点的环境空气吸收剂量率, nGy/h; D —陆地测点扣除宇宙射线响应后的环境空气吸收剂量率, nGy/h; $R_{\text{水}}$ —仪器在水面宇宙射线响应测量时读数; $R_{\text{陆}}$ —仪器在陆地测量时读数; K_1 —仪器测量量与空气吸收剂量率的转换因子

(测量量为空气比释动能率时, 该因子取 1; 测量量为照射量率时, 该因子取 8.76 nGy \cdot h⁻¹/ μ R \cdot h⁻¹^[10]; 测量量为周围剂量当量率且刻度源为¹³⁷Cs 时, 该因子取 1/1.20 nSv \cdot h⁻¹/nGy \cdot h⁻¹); K_2 —仪器刻度系数或校准因子(取检定或校准证书中环境辐射能量段的刻度或校准系数, 若有不同剂量率水平的刻度, 取水平最相近的刻度结果); K_3 —宇宙射线屏蔽校正因子(原野、道路取 1; 楼房取 0.8)。

陆地监测点位在扣除宇宙射线响应时忽略地理位置和海拔的差异, 取宇宙射线监测点位处的读数近似为当前监测点位的宇宙射线响应值^[11](不受屏蔽

情况)。

2 结果

所有参加比对仪器宇宙射线响应的测量结果、原野监测点位的测量结果、道路监测点位的测量结果、室内监测点位的测量结果和室内高剂量监测点位的测量结果见图 1~图 5。

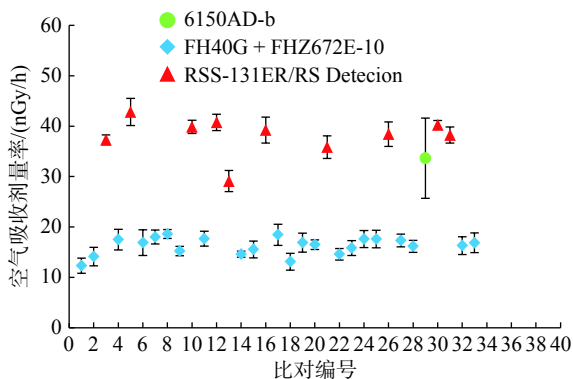


图 1 宇宙射线响应的测量结果
Figure 1 Measurement results of cosmic ray response

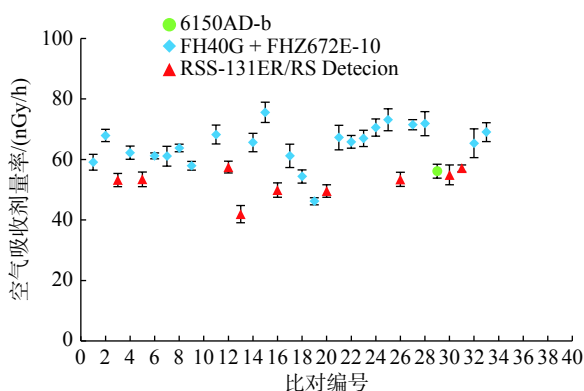


图 2 原野监测点位的 γ 辐射空气吸收剂量率测量结果
Figure 2 Measurement results of the γ radiation air absorbed dose rate in the fields

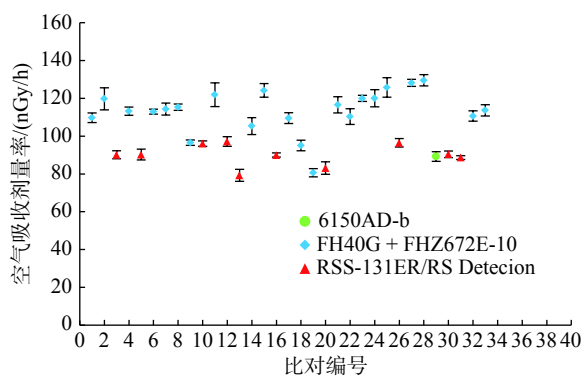


图 3 道路监测点位的 γ 辐射空气吸收剂量率测量结果
Figure 3 Measurement results of they radiation air absorbed dose rate on the road

由图 1 可见, 3 种不同类型的仪器对宇宙射线的响应值差异较大, 同类型的仪器响应值一致性较好; FH40G + FHZ672E-10 对宇宙射线的响应值较小, 这

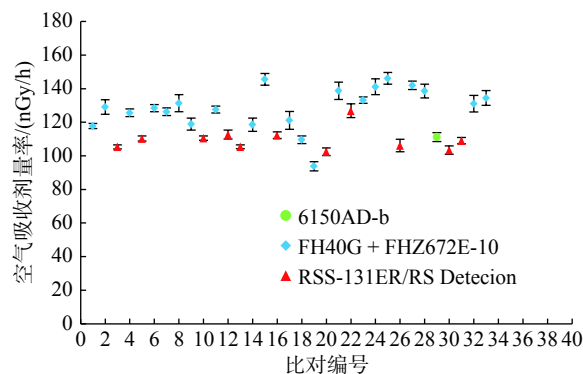


图 4 室内监测点位的 γ 辐射空气吸收剂量率测量结果
Figure 4 Measurement results of they radiation air absorbed dose rate indoor

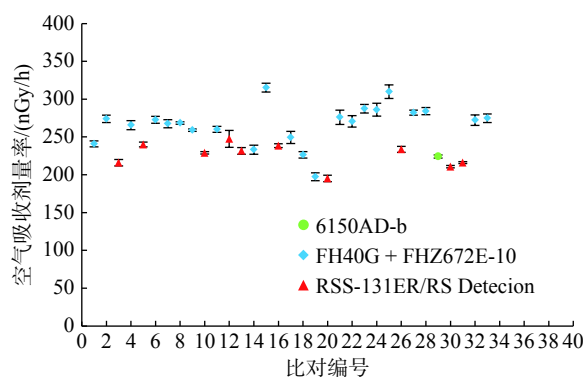


图 5 室内高剂量监测点位的 γ 辐射空气吸收剂量率测量结果
Figure 5 Measurement results of they radiation air absorbed dose rate at the high dose monitoring points indoor

与探头采用本底扣除技术(NBR—natural background rejection)有关; 而 RSS-131ER 等高压电离室对宇宙射线的响应值较大, 根据理论分析, 该响应值能够比较真实地反应监测点位的宇宙射线水平。由于对不同类型的仪器测量结果进行了整合, 5 个监测点位数据的弥散程度都较大。

考虑到不同类型的仪器宇宙射线响应值不具可比性, 因此只对原野监测点位、道路监测点位、室内监测点位和高剂量监测点位进行评价。比对结果评价采用《能力验证结果的统计处理和能力评价指南》(CNAS—LG02: 2014)中推荐的四分位数稳健 Z 比分数进行评价^[12-14]。稳健 Z 比分数法:

$$Z = \frac{X - M}{0.7413 \times IQR} \quad (3)$$

式中 X —参加比对单位的测量结果; M —中位值; IQR —四分位间距。

数据的统计判定采用 Z 比分数评价。 $|Z| \leq 2$, 判定结果为满意, 接受(A); $2 < |Z| < 3$, 结果可疑, 提出警告(W); $|Z| > 3$, 结果不满意, 记为离群值(N)。

为了便于对仪器进行综合评价, 对同一台仪器在

不同监测点位的 Z 比分数值计算均方根 \bar{Z} 值:

$$\bar{Z} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Z_i^2}{n}} \quad (4)$$

式中 n 为仪器参与测量的监测点位个数。

所有仪器在各监测点位评价值的计算结果见表 3, Z 比分数值和综合 \bar{Z} 值的计算结果见表 4。

表 3 所有仪器在各监测点位的评价值

Table 3 Evaluation values of all instruments at each monitoring point 单位: nGy/h

监测点位类型	最大值	最小值	极差	中位值	标准 IQR
原野	75.6	42.0	33.6	61.2	9.4
道路	129.5	79.2	50.3	109.7	19.4
室内	146.2	93.8	52.3	121.2	15.6
高剂量	315.3	195.2	120.2	259.0	31.4

所有仪器 Z 比分数值和综合 \bar{Z} 值的统计结果见表 5。

可以看出, 所有参加比对仪器的结果均可以接受。

3 讨 论

本次比对采用稳健 Z 比分数法进行评价, 不同类型仪器结果的整合导致各监测点位数据的弥散程度较大, 标准 IQR 值较大, 稳健 Z 比分数的绝对值均不大于 2, 评定结果均为满意。

此次比对宇宙射线响应测量值的结果较为满意, 主要是因为租用游船事前移除了压舱石, 减小了压舱石对监测结果的影响, 但游船材质为玻璃钢, 相比于木船使得测量结果略偏大。

本次比对, 大部分单位的仪器性能良好, 个别单位的仪器校准因子较大, 测量结果偏差较大, 虽然评价结果均为满意, 但个别仪器已达评价临界值。

为进一步提高各单位辐射监测技术水平和能力, 确保省网监测数据和信息的准确可靠, 根据本次比对反映出的问题, 提出以下几点建议:

1) 开展比对工作时, 在场地及辅助设备的选择上, 应综合考虑各方面因素, 尤其是木船自身材质的影响, 尽量将外界的客观影响降到最低;

2) 部分成员单位部分仪器校准因子偏差较大, 建议仪器返厂检修、重新设置并及时送计量院重新检定或校准, 同时加强日常的保养维护和性能检查, 确保使用时仪器能够正常工作;

3) 开展氡及其子体测量, 扣除其对测量结果的贡献。

表 4 Z 比分数值及评价结果

Table 4 Z score values and evaluation results

比对编号	仪器编号	原野		道路		室内		室内高剂量		综合平均 \bar{Z} 值	评价
		Z 值	评价	Z 值	评价	Z 值	评价	Z 值	评价		
01	1	-0.2	A	0.1	A	0.1	A	0.0	A	0.1	A
02	1	0.7	A	0.7	A	0.6	A	0.9	A	0.7	A
03	2	-0.8	A	-0.9	A	-0.6	A	-0.7	A	0.8	A
04	1	0.1	A	0.3	A	0.5	A	0.6	A	0.4	A
05	2	-0.8	A	-0.9	A	-0.3	A	-0.1	A	0.6	A
06	1	0.0	A	0.3	A	0.6	A	0.8	A	0.5	A
07	1	0.0	A	0.4	A	0.5	A	0.7	A	0.5	A
08	1	0.3	A	0.4	A	0.8	A	0.7	A	0.6	A
09	1	-0.3	A	-0.6	A	0.1	A	0.4	A	0.4	A
10	2	/	/	-0.6	A	-0.3	A	-0.4	A	0.4	A
11	1	0.7	A	0.8	A	0.6	A	0.5	A	0.6	A
12	2	-0.4	A	-0.5	A	-0.2	A	0.1	A	0.4	A
13	2	-2.0	A	-1.5	A	-0.6	A	-0.3	A	1.3	A
14	1	0.5	A	-0.1	A	0.1	A	-0.3	A	0.3	A
15	1	1.5	A	0.9	A	1.5	A	2.0	A	1.5	A
16	2	-1.2	A	-0.9	A	-0.2	A	-0.1	A	0.8	A
17	1	0.0	A	0.1	A	0.2	A	0.2	A	0.2	A
18	1	-0.7	A	-0.7	A	-0.4	A	-0.4	A	0.6	A
19	1	-1.5	A	-1.4	A	-1.2	A	-1.2	A	1.3	A
20	1	-1.2	A	-1.3	A	-0.7	A	-1.3	A	1.1	A
21	2	0.6	A	0.5	A	1.1	A	0.9	A	0.8	A
22	1	0.5	A	0.2	A	0.5	A	0.8	A	0.5	A
23	1	0.6	A	0.7	A	0.9	A	1.2	A	0.9	A
24	1	1.0	A	0.7	A	1.3	A	1.2	A	1.0	A
25	1	1.2	A	1.0	A	1.5	A	1.8	A	1.4	A
26	2	-0.8	A	-0.6	A	-0.5	A	-0.2	A	0.6	A
27	1	1.0	A	1.1	A	1.3	A	1.1	A	1.1	A
28	1	1.1	A	1.2	A	1.1	A	1.1	A	1.1	A
29	3	-0.5	A	-1.0	A	-0.3	A	-0.5	A	0.6	A
30	2	-0.6	A	-0.9	A	-0.7	A	-0.9	A	0.8	A
31	2	-0.4	A	-1.0	A	-0.4	A	-0.7	A	0.7	A
32	1	0.4	A	0.2	A	0.7	A	0.8	A	0.6	A
33	1	0.8	A	0.3	A	0.9	A	0.9	A	0.8	A

表 5 所有仪器 Z 比分数值和综合 Z 值的统计结果

Table 5 Statistical results of the Z score values and comprehensive Z-values of all instruments

监测点位类型	接受	警告	离群	总数	接受率(%)
原野	32	0	0	32	100
道路	33	0	0	33	100
室内	33	0	0	33	100
室内高剂量	33	0	0	33	100
综合 Z 值	33	0	0	33	100

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 曹龙生负责比对测量、数据处理、绘制图谱、撰写论文; 丁逊参与图谱绘制、参与论文修订; 杨阳设计比对思路、参加比对测量; 曾磊负责参加比对测量、文献调研; 胡晨剑设计比对方案; 吕安标参加比对测量、参与撰写论文; 廖宇航参加比对测量、收集数据

参考文献

- [1] 张瑜, 杨维耿, 陈啸炯, 等. 部分仪器对宇宙射线响应的测定[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33 (12): 1507-1510. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.12.018.
Zhang Y, Yang WG, Chen XJ, et al. Determination of the response of some instruments to cosmic ray[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2013, 33 (12): 1507-1510. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.12.018.
- [2] 郑国文, 陈凌. 宇宙射线剂量率随海拔变化规律研究[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26 (2): 142-144. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.02.004.
Zheng GW, Chen L. Study on the changing rule of cosmic-ray dose rate varies with altitude[J]. Chin J Radiol Health, 2017, 26 (2): 142-144. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.02.004.
- [3] 宋海青, 张伟珠, 廖建华, 等. 高压电离室宇宙射线响应因子测量[J]. 辐射防护通讯, 2017, 37 (1): 32-35. DOI: CNKI:SUN:DEFE.0.2017-01-008.
Song HQ, Zhang WZ, Liao JH, et al. Cosmic ray response factor measurement for high pressure ionization chambers[J]. Radiat Prot Bull, 2017, 37 (1): 32-35. DOI: CNKI:SUN:DEFE.0.2017-01-008.
- [4] 生态环境部. 2019 年全国辐射环境质量报告[EB/OL]. (2020-08-09)[2020-09-13]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/hjzlqt/hyfshj/202008/P020200809561669637371.pdf>.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Report of the national radiation environment in 2019[EB/OL]. (2020-08-09)[2020-09-13]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/hjzlqt/hyfshj/202008/P020200809561669637371.pdf>.
- [5] 国家环境保护局. GB/T 14853—1993 环境地表 γ 辐射剂量率测定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
State Environmental Protection Administration. GB/T 14853—1993 Norm for the measurement of environmental terrestrial gamma-radiation dose rate[S]. Beijing: Standard Press of China, 2003.
- [6] 任天山, 林莲卿, 陈志鹏, 等. 宇宙射线电离量的测定和几种探测器对宇宙射线的响应[J]. 辐射防护, 1987, 7 (3): 185-190. DOI: CNKI:SUN:FSFH.0.1987-03-003.
Ren TS, Lin LQ, Chen ZP, et al. Determination of cosmic ray ionization rate at sea level and the responses of some dosimeters to cosmic ray[J]. Radia Prot, 1987, 7 (3): 185-190. DOI: CNKI:SUN:FSFH.0.1987-03-003.
- [7] 金花, 岳清宇. 中国大陆地区居民所受宇宙射线剂量估算[J]. 原子能科学技术, 1989, 23 (6): 9-15.
Jin H, Yue QY. The estimation of the dose from cosmic radiation received by the population living at mainland areas in China[J]. At Energy Sci Technol, 1989, 23 (6): 9-15.
- [8] 王桂花, 秦欢, 李晓恒, 等. X- γ 剂量率仪对宇宙射线响应的测量研究[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (2): 166-167, 170. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.02.013.
Wang GH, Qin H, Li XH, et al. The study of measurement of cosmic ray response by X- γ dosimeter[J]. Chin J Radiol Health, 2019, 28 (2): 166-167, 170. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.02.013.
- [9] 宫增艳, 赵广翠, 李雪贞, 等. 不同方法监测环境 γ 辐射剂量率的结果比较与分析[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27 (1): 69-73. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2018.01.018.
Gong ZY, Zhao GC, Li XZ, et al. Comparison and analysis of environmental γ -radiation levels by using different monitoring methods[J]. Chin J Radiol Health, 2018, 27 (1): 69-73. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2018.01.018.
- [10] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 144—2002 用于光子外照射放射防护的剂量转换系数[S]. 北京: 法律出版社, 2002.
Ministry of Health of the People's Republic of China. GBZ/T 144—2002 Dose conversion coefficients for use in radiological protection against photon external radiation[S]. Beijing: Law Press, 2002.
- [11] 吴昱城, 胡丹, 赵顺平, 等. 全国辐射环境监测网络环境 γ 辐射剂量率测量比对[J]. 辐射防护通讯, 2016, 36 (1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2016.01.001.
Wu YC, Hu D, Zhao SP, et al. Intercomparison of environmental gamma radiation dose rate measurements within the national radiation environmental monitoring network of China[J]. Radiat Prot Bull, 2016, 36 (1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2016.01.001.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 27043—2012 合格评定能力验证的通用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 27043—2012 Conformity assessment—General requirements for proficiency testing[S]. Beijing: Standard Press of China, 2013.

- [13] 能力验证结果的统计处理和能力评价指南. CNAS—GL02: 2014[S]. 中国合格评定国家认可委员会, 2014. .
Guidance on statistic treatment of proficiency testing results and performance evaluation. CNAS—GL02: 2014[S]. China National Accreditation Service for Conformity Assessment, 2014.
- [14] 王欣欣, 于美香, 王桂花. 山东省2018年 γ 辐射剂量率测量比对结果分析[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (3) : 303-306. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.03.023.
- Wang XX, Yu MX, Wang GH. Analysis of comparison results of γ -radiation dose rate measurement in Shandong Province in 2018[J]. Chin J Radiol Health, 2019, 28 (3) : 303-306. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.03.023.
- (收稿日期:2020-08-24)

(上接第 153 页)

- [4] 国防科学技术工业委员会. EJ/T 1108—2001 密封箱室设计原则[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
National Defense Science, Technology and Industry Commission. EJ/T 1108-2001 Design principles for containment enclosures[S]. Beijing: Standard Press of China, 2001.
- [5] 叶涛. FLUENT软件在粉体颗粒混合领域中的应用[J]. 中国粉体技术, 2009, 15 (3) : 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2009.03.020.
Ye T. Application of FLUENT code in powder mixing field[J]. China Powder Sci Technol, 2009, 15 (3) : 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1008-5548.2009.03.020.
- [6] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通CFD工程仿真与案例实战[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 5-8.
Li PF, Xu MY, Wang FF. Proficient proficiency in CFD engineering simulation and case practice[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017: 5-8.
- [7] Kuang SB, Qi Z, Yu AB, et al. CFD modeling and analysis of the multiphase flow and performance of dense medium cyclones[J]. Miner Eng, 2014, 62: 43-54. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.012.
- [8] 娄春景. 基于CFD的缓冲罐粉料逸出研究[J]. 中国海洋平台, 2016, 31 (6) : 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2016.06.011.
Lou CJ. Research of particle escaping of bulk cement surge tank based on CFD[J]. China Offshore Platf, 2016, 31 (6) : 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4500.2016.06.011.
- [9] 王杰, 叶长青, 孟祥玮. 沙尘试验箱内部流场的数值仿真与分析[J]. 检验检疫学刊, 2016, 26 (6) : 21-24. DOI: CNKI:SUN:XDSJ.0.2016-06-006.
Wang J, Ye CQ, Meng XW. The stimulation and analysis of the gas-solid two-phase flow in dust and sand test chamber[J]. J Insp Quar, 2016, 26 (6) : 21-24. DOI: CNKI:SUN:XDSJ.0.2016-06-006.
- [10] 毛娅, 陈家乐, 陈作炳, 等. 采用拉格朗日法与欧拉法模拟旋风筒内气固两相流的对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (2) : 459-465. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.02.008.
Mao Y, Chen JL, Chen ZB, et al. Comparative study on cyclone gas-solid two-phase flow using Lagrange method and Euler method[J]. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36 (2) : 459-465. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.02.008.
- (收稿日期:2020-10-01)

欢迎订阅! 欢迎投稿!

《中国辐射卫生》

网站: www.zgfsws.com

邮箱: redi@chinajournal.net.cn