

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.001

· 论 著 ·

基于 Geant4 模拟³⁷Ar 活度测量计数损失的修正方法

孔淑颖¹, 杨宝路¹, 王仁生², 张明³, 路天翔¹, 拓飞¹

1. 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 北京 100088; 2. 苏州大学医学部放射医学与防护学院, 江苏 苏州 215123; 3. 中国计量科学研究院, 北京 100029

摘要: **目的** 采用内充气正比计数器开展放射性惰性气体³⁷Ar 活度绝对测量时, 需要对计数器阈值以下的计数损失进行修正。**方法** 利用 Geant4 蒙特卡罗模拟软件, 构建正比计数器模型并获得³⁷Ar 能量沉积谱, 模拟分析计数损失产生原因及修正方法。**结果** 模拟计数器工作压力 60 kPa 下对光子探测效率, 结果仅为 38.7%, 漏计数损失主要来源于光子逃逸产生的壁效应, 可通过增大工作气体压力的方式减小, 并通过外推的方式予以修正。模拟压强 100 kPa 下, 壁效应影响为 4.4%, 与实验偏差在 0.6% 以内。**结论** 可利用 Geant4 确定计数器阈值以下漏计数修正因子, 从而实现正比计数器法对³⁷Ar 活度的准确测量。

关键词: ³⁷Ar; Geant4; 正比计数器; 探测效率; 计数损失修正

中图分类号: TL811 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)02-0093-05

Counting loss correction in ³⁷Ar activity measurement based on Geant4 simulation

KONG Shuying¹, YANG Baolu¹, WANG Rensheng², ZHANG Ming³, LU Tianxiang¹, TUO Fei¹

1. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088 China; 2. School of Radiation Medicine and Protection, Medical College of Soochow University, Suzhou 215123 China; 3. National Institute of Metrology, Beijing 100029 China

Abstract: **Objective** To correct the counting loss of ³⁷Ar below the activity threshold during the measurement of the absolute activity of the inert radioactive gas ³⁷Ar using the proportional counter filled with gas. **Methods** Monte Carlo simulation with Geant4 was performed to establish a proportional counter model and output the energy deposition spectrum of ³⁷Ar, which were used to simulate and analyze the causes and correction of counting loss. **Results** The photon detection efficiency was only 38.7% at 60 kPa. The counting loss was mainly caused by the wall effect produced by the photons, which could be reduced by increasing the gas pressure and corrected by extrapolation. The influence of wall effect at 100 kPa was 4.4%, and the deviation between simulation and experiment was < 0.6%. **Conclusion** A factor could be calculated by Geant4 simulation for the correction of counting loss, thus achieving the accurate measurement of ³⁷Ar activity by proportional counter.

Keywords: ³⁷Ar; Geant4; Proportional counter; Detection efficiency; Counting loss correction

Corresponding author: TUO Fei, E-mail: flytuo@163.com

随着各国对核电需求的增加及核能的广泛应用, 我国作为拥有最大规模在建核电站的国家, 日益重视起对放射性惰性气体流出物的监测以及对核辐射突发事件开展应急卫生工作^[1-2]。核电站反应堆工作与核爆试验过程中都会产生放射性惰性气体, 如¹³³Xe、¹³⁵Xe、³⁷Ar、⁸⁵Kr 等, 其中¹³³Xe、³⁷Ar 已被全面禁止核试验条约组织确定为现场视察(on-site inspections, OSI)的核查核素(CTBT/PC-10/1/Annex II, Appendix

VIII)^[3]。对放射性惰性气体活度浓度的准确测量是提升核技术发展能力与监测各国核辐射突发事件信息、采取应急响应举措与快速组织有效核防护的关键。

分析环境中放射性活度较低的样品时, 探测效率对准确获得放射性核素活度至关重要^[4]。³⁷Ar 通过核爆过程或核反应堆中⁴⁰Ca(n, α)Ar³⁷反应产生, 半衰期为 35.04 d, 衰变方式为轨道电子俘获。其中, K 壳层发射的俄歇电子能量为 2.82 keV, 占分支比 81.5%;

作者简介: 孔淑颖(1999—), 女, 山东枣庄人, 在读硕士研究生, 研究方向为辐射检测与评价。E-mail: 549830208@qq.com
通信作者: 拓飞, E-mail: flytuo@163.com

特征 X 射线能量为 2.82 keV, 分支比为 8.7%; L 壳层发射的俄歇电子或 X 射线能量为 0.27 keV, 分支比为 8.9%^[5]。³⁷Ar 作为惰性气体, 衰变射线能量低, 内充气正比计数器是具有高探测效率的³⁷Ar 活度测量方法。但基于内充气正比计数器, 必需考虑测量装置电子学系统死时间、本底、端效应、阈值以下漏计数等因素对测量结果的影响, 对测量计数率进行相应的修正^[6]。

在对放射性惰性气体计数率进行修正过程中, 死时间和本底修正可通过优化测量系统、增加屏蔽体实现; 端效应则可通过长度补偿法予以修正^[5]。但阈值以下漏计数的损失无法直接测量, 实验上一般采用改变电子学下阈值和改变气压的方式进行外推修正^[7], 或在压强难以改变时, 运用蒙特卡罗模拟确定修正因子。本文通过蒙特卡罗理论计算的方法, 构建正比计数器模型并获得³⁷Ar 能量沉积谱, 模拟不同条件下探测效率及计数损失差异, 研究得到计数损失修正因子, 为提高实验中³⁷Ar 活度测量的效率与准确性提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 Geant4 软件 本文基于 Geant4 蒙特卡罗模拟软件^[8], 对³⁷Ar 活度绝对测量过程中漏计数修正方法与修正因子等开展系统研究。Geant4 是一个基于 C++ 编写的开源软件包, 用于准确地模拟粒子在物质中的运输及参与的物理过程, 主要包括几何体与材料构造、粒子径迹及物理过程、探测器灵敏度、轨迹存储与可视化、结果读取与分析等^[8]。Geant4 提供一系列物理模型来描述射线和物质相互作用过程, 用户可以按需自由选择。依据³⁷Ar 的衰变特性及粒子能量范围, 本模拟使用 Geant4 内建的物理过程包 FTFP_BERT。该物理过程包可以较好描述输入能量仅为几个 keV 的粒子所发生的光电效应等物理过程。程序的模拟结果以 ROOT 文件格式存储, 并基于 ROOT 进行数据分析^[9]。

1.2 正比计数器建模 正比计数器是一种气体探测器, 因其高增益和低噪音, 适用于探测低能 X/β 射线。尤其, 在进行活度测量时, 对 β 射线的探测效率接近百分之百^[10]。本研究工作中, 为了便于将模拟结果与实验数据对比, 在探测器建模方面, 选取已进行过测量实验的移动式³⁷Ar 快速探测系统 (movable ³⁷Ar rapid detection system, MARDS)^[11]所采用的

LND 4953 型正比计数管。该计数管总长 550 mm, 灵敏体积为 950 ml, 内置工作气体为 P10(氙甲烷混合气体), 实验常用压强 60 kPa。构造示意图如图 1, 模型输入参数见表 1^[12]。

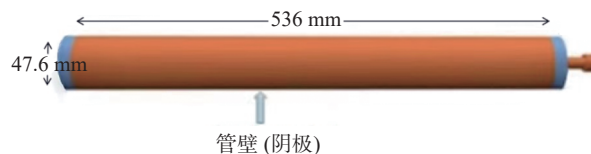


图 1 正比计数器结构

Figure 1 Schematic of proportional counter

表 1 蒙特卡罗输入模型参数

Table 1 Parameters used in the Monte Carlo model

结构	材料	长度/mm	半径/厚度/mm	压强/kPa
灵敏体积	P10 (90%氙气, 10%甲烷)	536	23.8	60
管壁	铜	550	1.65	-
管端	铜	-	7	/
计数管外围	空气	1000	500	100

1.3 输出程序设置 本程序将发生 1 次电子俘获衰变定义为发生 1 个 Event(事件), 多次 Event 组成运行执行程序 Run。将工作气体区设置为灵敏体积, 气体压强可调。粒子发射位置均匀分布在圆柱体内, 以衰变道形式将 2.82 keV 电子与 2.82 keV 光子按照各自分支比抽样。发射方向为 4π 同性, 输出粒子径迹与能量沉积结果。为了增加运行结果的普遍性与减小误差, 每种条件均模拟了 10⁶ 个事件。参考实际应用的内充气正比计数器的能量分辨率和信噪比, 对输出数据进行能量分辨率为 20% 的高斯展宽, 对应 X 射线和俄歇电子的能峰位置, 选择 1.5 keV 为下阈值, 3.5 keV 为能峰上阈值。结果输出模型可视化视图、能量沉积谱、探测粒子计数(除以输入粒子数 10⁶ 即为探测效率)。

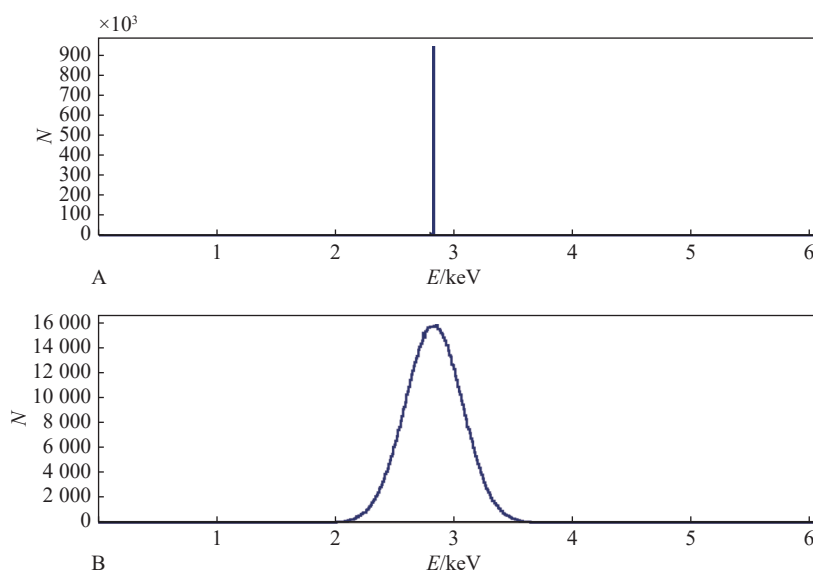
2 结果

2.1 ³⁷Ar 探测效率与计数损失 将³⁷Ar 衰变过程中释放的俄歇电子和特征 X 射线按照各自分支比与能量对应输入后, 在 60 kPa 下获得粒子运行轨迹及粒子能量沉积谱如下图 2、3, 其中横轴为粒子在计数管中沉积的能量 E, 纵轴为计数 N。



图 2 粒子轨迹可视化视图

Figure 2 Particle trajectory visualization



注：A.原始图谱；B.高斯展宽图谱。

图3 ^{37}Ar 能量沉积谱

Figure 3 Energy deposition spectrum of ^{37}Ar

可以看出, 由于 ^{37}Ar 衰变产生单能粒子, 与工作气体相互作用几乎将能量全部沉积在灵敏体积内, 并在 2.8 keV 左右形成单能峰。因此活度测量时无需进行阈值以下的小脉冲幅度修正, 实验上对小脉冲计数损失的处理, 只需以峰计数除以能量衰变分支比 0.902 即可得到修正后计数。

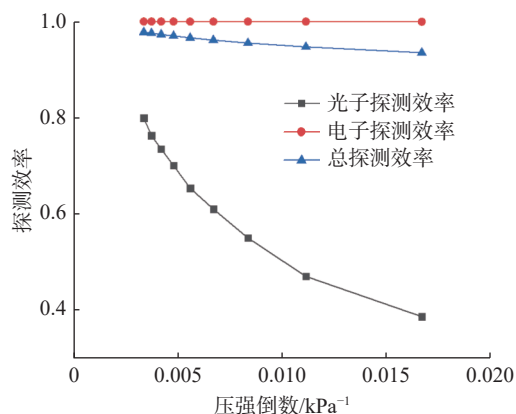
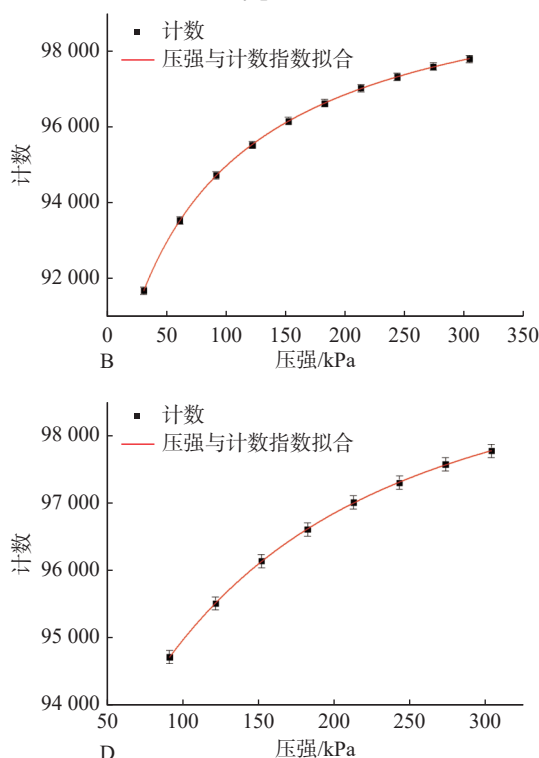
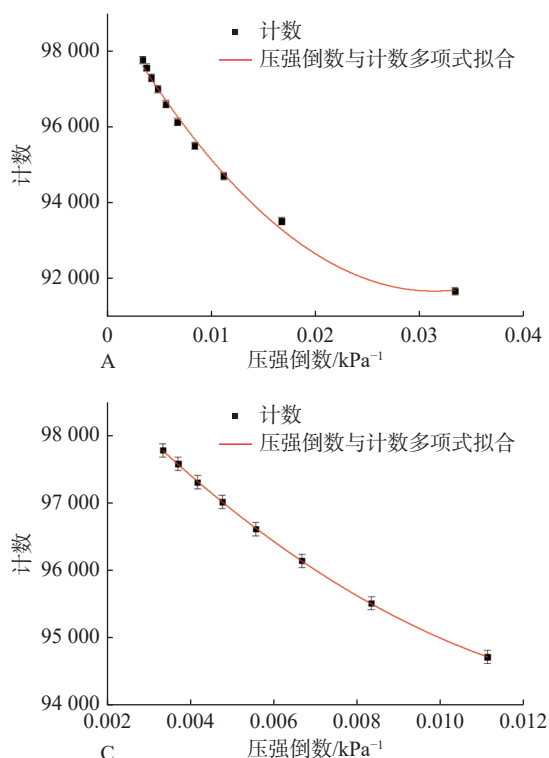
当 ^{37}Ar 衰变产生的粒子与工作气体发生相互作用时, 将能量损失在气体介质中, 产生电子-离子对被正比计数管内电极收集^[13]。理论上, 对于 2.82 keV 的低能粒子而言, 发生电离相互作用后产生的离子对可将能量全部沉积在灵敏体积内, 正比计数器对电子探测效率应趋近 100%。但由图 3 模拟结果表明, 在输入初始粒子数 10^6 的前提下, 正比计数管灵敏体积对粒子探测效率为 93.5%。对于模拟探测效率与理论数值的差异, 考虑是由于 ^{37}Ar 衰变同时发射俄歇电子和 X 射线 2 种不同粒子所导致。因此分别将电子和 X 射线按分支比单独进行模拟以分析差异来源。经模拟发现当输入低能俄歇电子时正比计数管灵敏体积探测效率高达 99.9%, 说明能量几乎完全沉积; 输入光子灵敏体积探测效率仅为 38.7%, 说明在设置的 0.6 个大气压的情况下, 仅有少部分光子在工作气体内沉积能量。在能量小于 10 keV 时, X 射线与物质主要发生光电效应被吸收, 其中 K 壳层发生几率最大, 约占 80%, 每个原子所发生光电效应的总截面 σ 可近似表示为^[14]:

$$\sigma = \frac{KZ^5}{E_\gamma^n} \quad 1)$$

式中, Z 为吸收物质的原子序数; E_γ 为 γ 光子能量; n 为常数, 从低能的 7/2 到高能 1; K 为常数。可以看出, 光电反应截面与原子序数有强烈的依赖关系, P10 气体组分为低原子序数物质氩甲烷, 光子与工作气体反应截面较小, 靠近计数器管壁区域的粒子直接逃逸出灵敏区域, 沉积在阴极壁上而不被探测到产生漏计数, 因此 ^{37}Ar 活度测量过程中计数损失主要来源于光子逃逸产生的“壁效应”。

2.2 ^{37}Ar 活度测量壁效应修正 对于发生在探测器壁附近的衰变事件, 当粒子向管壁方向发射时, 有较大的概率不被测量。随着灵敏体积内工作气体压力增加, 气体对探测射线的阻止能力增强, 带电粒子沉积能量增加^[15]。因此由计数器有限边界区域引起的“壁效应”漏计数损失, 会随着计数器灵敏体积内工作气体压强增加而减小。根据正比计数器对电子和光子探测效率模拟结果的差异, 分别对 2 种粒子进行模拟, 分析俄歇电子及 X 射线壁效应随压强的变化情况。取 60、90、120、150、180、210、240、270、300 kPa 9 个点, 得到不同压强倒数下探测效率结果如图 4 所示。

可以看出随着压强改变, 电子探测效率变化不大, 对 X 射线影响较大, 压强低时 X 射线探测效率低, 在 100 kPa 以下低于 50%, 随着压强增加壁效应显著减小, 且呈高阶项曲线变化趋势。依据上述模拟结果, 对壁效应产生计数损失的修正应通过改变气体压强, 获取不同压强下的计数, 并按照适合的函数形式进行曲线拟合后外推至无穷大压强时的探测粒子数。为研究最优修正方法, 增加低压条件 30 kPa, 模

图 4 不同压强下³⁷Ar 探测效率曲线图Figure 4 ³⁷Ar detection efficiency at different pressures

注: A.30~300 kPa; B.30~300 kPa; C.90~300 kPa; D.90~300 kPa。

图 5 不同压强下³⁷Ar 衰变的能量沉积计数Figure 5 Energy deposition counts of ³⁷Ar decay at different pressures

由模拟结果图 5A、图 5B 可见,当工作气体压强低于 90 kPa 时,壁效应随压强变化幅度较大;高于 90 kPa 时,壁效应随压强变化幅度减小,故选取 90~300 kPa 压强进行探测计数模拟,结果如图 5C、图 5D 所示。对 30~300 kPa 的计数采用多项式拟合压强倒数外推方法偏差为 0.88%,压强与探测粒子计数指数拟合方法偏差为 0.61%;对 90~300 kPa 进行多项式拟合压强倒数外推方法偏差为 0.10%,压强与探测粒子计数指数拟合方法偏差为 0.29%。因此为获得更精确的³⁷Ar 活度浓度测量结果,实验上可将工作气体压强设置为 100 kPa 以上,以此降低压强外推得到的壁效应漏计数修正因子的不确定度。然而,考虑

拟由低至高不同工作气体压力下灵敏体积内粒子能量沉积计数,采取对压强倒数与模拟探测计数多项式拟合(式 2),以及压强与模拟探测计数指数拟合(式 3)两种常用修正方式,其中 x 为计数管工作气体压强, kPa; y 为压强为 x 时,计数管探测的样品计数。图 5 为模拟拟合曲线。

$$y = k_1 x + k_2 x^2 + b \quad (2)$$

式中, k_1, k_2, b 为待定常数。

$$y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + (x/x_0)^p) \quad (3)$$

式中, A_1, A_2, x_0, p 均为待定常数。

到实际实验条件下,稳定的高压条件往往不易实现,且高压条件下,经调节后的正比计数器的工作电压也会随之增高。为此,选取与中国工程物理研究院进行³⁷Ar 活度测量实验所设置对应的 100、150、200、250、300、350、400 kPa 7 组压强^[11],采用不同压强倒数与探测计数进行多项式拟合并外推至零,即获得压强无穷大时的计数,除以各压强下的探测计数得到修正因子,结果列于表 2。通过数据拟合及模拟修正因子分析可得,100 kPa 下³⁷Ar 活度测量壁效应影响为 4.4%,随着压强增大,修正因子逐渐减小,总体而言,每个压强点下得到的修正因子模拟结果与实验结果的相对偏差在 0.6% 以内。

表 2 不同压强下³⁷Ar 壁效应计数损失修正因子Table 2 Correction factor of ³⁷Ar counting loss due to wall effect at different pressures

P(kPa)	模拟探测计数	实验探测计数	模拟修正因子	实验修正因子	相对偏差(%)
100	957856	117831	1.044	1.043	0.09
150	968397	119091	1.033	1.032	0.09
200	974849	120444	1.026	1.020	0.58
250	979521	120541	1.021	1.019	0.19
300	982670	120917	1.018	1.016	0.19
350	984886	121326	1.015	1.013	0.19
400	986735	121423	1.014	1.012	0.19

3 讨 论

本文基于 Geant4 模拟放射性惰性气体³⁷Ar 活度浓度测量过程中计数损失产生原因及修正方法,发现³⁷Ar 衰变释放 X 射线对探测效率影响较大,漏计数损失主要来自光子产生的壁效应。但因 X 射线所占分支比小于 10%,其余为将能量全部沉积在灵敏体积内的电子,计数管对³⁷Ar 总探测效率仍然可达到 90%以上,因此可以采用正比计数器法实现³⁷Ar 活度绝对测量。

当气体压强无穷大时,没有射线逃逸出计数器的灵敏体积,壁效应引起的漏计数趋于零^[15]。对壁效应引起的漏计数损失修正通过增加工作气体压强,采用不同压强倒数与计数进行多项式拟合,并获取修正因子的方法实现。使用 Geant4 构建正比计数管模型,模拟探测计数并获取不同压强下修正因子,结合实验压强下测量得到的计数率即可获得放射性核素活度测量结果,可避免实验中调节压强所引起工作电压、上下阈值的改变而对测量结果产生影响。后续可基于此 Geant4 程序模拟不同衰变特性放射性惰性气体如⁸⁵Kr、³H 等,对阈值以下计数损失进行分析和修正,并优化实验操作条件,实现放射性惰性气体活度浓度准确测量。

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 孔淑颖负责研究设计、结果分析及论文撰写和修改;杨宝路、王仁生、张明、拓飞负责参与审阅及提出修改意见;路天翔负责参与论文修订

参考文献

- [1] 陈惠芳,袁龙,付照明,等.国家核辐射突发事件卫生应急队伍组建与管理探讨[J].中国辐射卫生,2021,30(2):201-204. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.017.

10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.017.

Chen HF, Yuan L, Fu XM, et al. Discussion on establishment and management of national health emergency team for nuclear radiation emergency[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30(2): 201-204. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.017.

- [2] 王自路,王伟,拓飞,等.我国放射性惰性气体Kr、Xe监测体系的溯源现状[J].中国辐射卫生,2019,28(6):730-733. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.035.

Wang ZL, Wang W, Tuo F, et al. Current status of traceability of radioactive inert gas (Kr, Xe) monitoring system in China[J]. Chin J Radiol Health, 2019, 28(6): 730-733. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.035.

- [3] Kirchner G, Gerfen F, Heise A, et al. Will ³⁷Ar emissions from light water power reactors become an obstacle to its use for nuclear explosion monitoring?[J]. J Environ Radioact, 2020, 223-224: 106392. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106392.

- [4] 王硕,杨宝路,周强,等.无源效率刻度在马尔杯状气体源活度测量中的应用[J].中国辐射卫生,2022,31(1):6-12. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.002.

Wang S, Yang BL, Zhou Q, et al. Application of sourceless efficiency calibration in activity measurement of gas source in Marinelli beaker[J]. Chin J Radiol Health, 2022, 31(1): 6-12. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.002.

- [5] Cleveland BT, Daily T, Davis R Jr, et al. Measurement of the solar electron neutrino flux with the homestake chlorine detector[J]. Astrophys J, 1998, 496(1): 505. DOI: 10.1086/305343.

- [6] 李奇,樊元庆,王世联,等.低本底内充气正比计数管测量³⁷Ar活度[J].原子能科学技术,2019,53(4):734-738. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0453.

Li Q, Fan YQ, Wang SL, et al. Measurement of ³⁷Ar activity by low background internal gas proportional counter[J]. At Energy Sci Technol, 2019, 53(4): 734-738. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0453.

- [7] Mori C, Wu Y, Agemura T, et al. Evaluation of counting loss and its correction for small pulses in internal counting with proportional counters[J]. Appl Radiat Isot, 1998, 49(9/11): 1107-1111. DOI: 10.1016/S0969-8043(97)10028-8.

(下转第 101 页)

- fighting against coronavirus disease 2019[J]. *West China Med J*, 2020, 35 (3) : 249-254. DOI: 10.7507/1002-0179.202002294.
- [4] 全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国职业病防治法[Z]. 北京: 法律出版社, 2020.
- National People's Congress Standing Committee. Law of the People's Republic of China on the Prevention and Control Occupational Diseases[Z]. Beijing: Law Press China, 2020.
- [5] 王恺怡, 丁艳秋, 胡爱英, 等. 2020年全国外照射个人剂量监测能力考核结果与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30 (5) : 555-559. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.006.
- Wang KY, Ding YQ, Hu AY, et al. Results and analysis of monitoring ability assessment of external exposure personal dose in 2020[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30 (5) : 555-559. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.006.
- [6] 国家卫生健康委员会, 国家中医药管理局. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版)[EB/OL]. 2020. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/19/content_5535757.htm.
- National Health Commission of the People's Republic of China, National Administration of Traditional Chinese Medicine. Diagnosis and treatment plan for novel coronavirus pneumonia (Trial Version 8)[EB/OL]. 2020. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/19/content_5535757.htm.
- [7] 中华人民共和国卫生部. 放射工作人员职业健康管理办[EB/OL]. 北京: 中国标准出版社, 2007. http://www.gov.cn/gzdt/2007-06/21/content_655923.htm.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. Measures for occupational health management of radiation workers[EB/OL]. Beijing: Standard press of China, 2007. http://www.gov.cn/gzdt/2007-06/21/content_655923.htm.
- [8] 田青香, 万玲, 冯泽臣, 等. 2015年北京市职业外照射个人剂量监测及分析[J]. *中国辐射卫生*, 2017, 26 (3) : 361-362. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.03.037.
- Tian Q, Wan L, Feng ZC, et al. Analysis of personal dose monitoring results of interventional radiation workers in Shandong Province from 2012 to 2015[J]. *Chin J Radiol Health*, 2017, 26 (3) : 361-362. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2017.03.037.
- [9] 牛菲, 闵楠, 陈英民, 等. 2012-2015年山东省介入放射工作人员个人剂量监测结果分析[J]. *中国辐射卫生*, 2016, 25 (6) : 663-665. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.06.008.
- Niu F, Min N, Chen YM, et al. Analysis of personal dose monitoring results of interventional radiation workers in Shandong Province from 2012 to 2015[J]. *Chin J Radiol Health*, 2016, 25 (6) : 663-665. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.06.008.
- [10] 吴笛, 李德红, 赵桂芝, 等. 热释光剂量计测量结果影响因素研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2016, 36 (10) : 1029-1031. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.10.009.
- Wu D, Li DH, Zhao GZ, et al. Study on the influence factors of the measurement of thermo-luminescence dosimeters[J]. *Nucl Electron Detect Technol*, 2016, 36 (10) : 1029-1031. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.10.009.
- [11] 李春富, 田青香, 张雷, 等. 2015—2019年北京市通州区放射工作人员个人剂量监测异常结果分析[J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31 (1) : 13-16. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.003.
- Li CF, Tian QX, Zhang L, et al. An analysis of the abnormal results of individual dose monitoring for radiation workers in Tongzhou District, Beijing, China, 2015-2019[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31 (1) : 13-16. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.003.

(收稿日期:2022-09-30)

(上接第 97 页)

- [8] CERN Geant4 User's Guide[EB/OL]. [2022-09-09]. <http://geant4.web.cern.ch/geant4>.
- [9] Brun R, Rademakers F. ROOT-An object oriented data analysis framework[J]. *Nucl Instr Methods Phys Res Sect A:Accel, Spectr Detect Associat Equip*, 1997, 389 (1/2) : 81-86. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00048-X.
- [10] 王自路, 李语奇, 张明, 等. 基于内充气正比计数器长度补偿法测量⁸⁵Kr放射性活度浓度[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53 (12) : 2465-2470. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0259.
- Wang ZL, Li YQ, Zhang M, et al. Radioactivity concentration measurement of ⁸⁵Kr using length-compensated internal gas proportional counting method[J]. *At Energy Sci Technol*, 2019, 53 (12) : 2465-2470. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0259.
- [11] 曹琳. 内充气正比计数管测量³⁷Ar活度的探测效率研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.
- Cao L. Detection efficiency of ³⁷Ar activity[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008.
- [12] LND, INC. Nuclear Radiation Detectors[EB/OL]. <https://www.lndinc.com/products/special-products/4953>.
- [13] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1981: 52-60.
- Fudan University, Tsinghua University, Peking University. *Nucl phys exp methods*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981: 52-60.
- [14] 于孝忠. 核辐射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1981: 103-109.
- Yu XZ. *Nuclear radiation physics*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1981: 103-109.
- [15] 王自路. 放射性惰性气体⁸⁵Kr活度量值传递技术方法研究[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2020. DOI: 10.27511/d.cnki.gzyyy.2020.000088.
- Wang ZL. Research on technical methods of ⁸⁵Kr activity standard transfer[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Protection, 2020. DOI: 10.27511/d.cnki.gzyyy.2020.000088.

(收稿日期:2022-09-08)