

地表及空勤航线中子辐射水平测量现状

张京, 丁艳秋, 拓飞, 周强, 李则书

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室, 北京 100088

摘要: **目的** 调研地表和空勤航线中子辐射水平测量研究状况, 研究天然中子对环境辐射的贡献。**方法** 收集地空界面环境中子的来源及其研究文献报道的最新数据, 研究比较国内外地空界面环境中子测量结果。**结果** 在海平面水平来自宇宙射线辐射中子成份的周围剂量当量率为 $5.5 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$, 民用航空国际航线航行器上的中子剂量率为 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。**结论** 人们主要侧重于对人工中子源中子辐射场的理论研究、实验测量、应用和防护等, 而目前国内外对地空界面上天然中子辐射场的研究较少, 尚需深入研究。

关键词: 环境中子; 注量; 剂量率; 测量方法

Investigation of Air Ground Interface Environmental Neutron Radiation Level. ZHANG Jing, DING Yan - qiu, TUO Fei, ZHOU Qiang, LI Ze - shu. *National Institute for Radiological Protection, China CDC, Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, China CDC, Beijing 100088 China.*

Abstract: **Objective** To study the status of ground to air interface environment of neutron radiation level, give the contribution of natural neutron radiation environment. **Methods** The latest studies of the literature about the air ground interface environmental neutron data at home and abroad were collected and the comparative study of air interface environmental neutron measurement situation were carried out. **Results** The ambient dose equivalent rate from cosmic ray neutron radiation component at sea level is $5.5 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$. The neutron dose rate on aircraft of international routes is $2.5 \text{ Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. **Conclusion** There are many research focuses on artificial neutron source, such as theoretical research of neutron radiation field, experimental measurement, application and radiation protection of natural neutron radiation field. Further research needs to be carried out for air interface.

Key words: Environmental Neutron; Fluence; Dose Rate; Measurement Method

中图分类号: R144.1 文献标识码: B 文章编号: 1004 - 714X(2017)02 - 0217 - 04

通过调研地表和空勤航线中子辐射水平测量研究状况, 从环境辐射测量、辐射防护及辐射生物效应等角度分析研究天然中子对环境辐射的贡献。中子与 γ 和 X 射线不同, 属于高传能线密度辐射, 其品质因数 Q (品质因数代表估计辐射效应的因子, 用于计算吸收剂量的微观分布对危害的影响) 作为中子能量函数的连续曲线。特别是当快中子与机体组织作用时, 产生的反冲质子和感生 γ 射线对机体有强烈的辐射损伤作用^[1-2]。因此, 研究地空界面天然中子对环境辐射的贡献具有重要的科学意义与实用价值, 天然中子对环境辐射的贡献不容忽视的。

1 中子探测原理

自从 1932 年英国物理学家查德威克发现中子以来, 中子物理的相关研究取得了快速发展, 目前已成为

作者简介: 张京 (1960 -), 男, 副主任技师, 研究方向为辐射检测与评价。
通讯作者: 拓飞, Email: tuofei@nirp.cn

中子物理已成为核物理学科的重要分支之一, 其广泛应用于众多的科学技术领域。众所周知, 作为原子核的基本粒子之一, 中子本身不带电, 其质量近似于质子。处于自由状态的中子不稳定, 半衰期仅 $(610.0 \pm 1.0) \text{ s}$, 经过弱相互作用后衰变, 其衰变表达式如公式 (1) 所示^[3]:



一般核探测器的探测原理是通过带电粒子与物质的相互作用, 使其电离或激发而被探测, 中子与物质相互作用不能直接引起电离或激发而不能直接被探测。而中子与原子核发生相互作用后以两种方式存在, 一种是被原子核散射。另一种是被原子核吸收, 形成一个复合核, 而复合核仍有可能发射中子或其它带电粒子、光子, 甚至可能发生裂变^[3]。中子探测主要基于以下相互作用形式而被探测^[1-3]: ①弹性散射引起的核反冲; ②中子与原子核反应产生带电粒子; ③核裂变;

④中子被俘获引起的核激活。中子探测主要是依靠中子与物质相互作用,因此对探测器材料的选择也非常重要,主要需要考虑以下几个方面:①与中子反应截面要大;②反应截面随中子能量的变化要平滑;③反应产物要便于测量;④材料容易获得、制备和提纯,并且经济。

为了探测能量范围较宽的反射宇宙中子,在目前条件下,天然中子的探测通常选用核反应法。中子与原子核相互作用产生的带电粒子,其反应能足够在电离室和闪烁晶体中能产生足够大的脉冲而被记录。按照中子探测应考虑的原则,选用的探测器应具备探测效率高、 $n-\gamma$ 分辨容易,使用方便,适应性强等特点。另外一种对中子的探测是一种用径迹蚀刻技术来进行中子探测的固体剂量片。这种剂量片测量的是质子,对 β 、 X 和 γ 辐射不敏感。通常将它与对中子不灵敏的光致发光 OSL 或者热释光 γ 探测器组合成一体,放在同一个胸章中结合使用,形成适用于测量中子、 β 、 X 和 γ 混合场的个人剂量计。

2 天然中子的来源及其研究意义

地空界面上天然中子的来源主要分为以下四部分^[1]:①入射宇宙中子流(或称大气中子),是初级宇宙射线与空气的原子核(主要是 N 与 O)相互作用的产物。由于中子的半衰期较短,太阳系以外的中子很难到达地球表面,在地空界面上测得的入射的中子主要是大气中子,以及极少量的太阳发射的中子;②反射宇宙中子流,是入射宇宙中子与地表介质的原子核发生弹性或者非弹性碰撞后反射出地面的中子组成部分;③宇宙射线中其他粒子与地表介质的原子核相互作用产生的中子;④天然放射性某些重核裂变产生的中子。地空界面上在某一时间内中子辐射场的强弱和中子能谱的分布主要依赖于初级宇宙线的强度,另外地表介质成分、湿度、密度以及大气等参数也对地空界面上的中子辐射场有一定的贡献。通过研究分析可以确定不同地区和地质景观下环境中子辐射的效应,给出天然中子辐射对辐射总剂量的贡献份额。由于宇宙中子是初级宇宙射线与大气相互作用的产物,因此对地空界面上天然中子的测量方法可作为指示大气瞬态变化的新技术,另外,也可以作为城市工程地质填图的一种有效方法^[4]。通过对地空界面天然中子辐射场的调查研究,在环境辐射测量、辐射防护等方面具有重要的科学意义与实用价值。

3 国内外地空界面环境中子测量状况

一般将天然辐射分为三类进行讨论:宇宙辐射、地表辐射和人工辐射,UNSCEAR 2000 报告^[5]中在宇宙辐射部分对天然中子辐射分地面水平和航线高度的暴露水平两部分进行论述。

3.1 地面水平的暴露水平 从 UNSCEAR 1993 开始^[6],将低能中子和高能中子区分开,对地面水平公众暴露的宇宙辐射水平重新进行了评估。由于对海平面水平的中子所做人体的有效剂量进行评估本身就很难,尽管现有的关于中子注量和能量贡献的可用数据很少,最近的一些实验和计算在不断的进行探索。因为早期的仪器对于高能中子响应很差,而它恰恰是中子谱的重要组成部分,人们认为应该增强对高能部分注量率和剂量当量率的评估。通过测量和相关计算给出德国海拔为 2963 km Zugspitze 山顶上中子的注量率(fluence rate)为 $0.126 \pm 0.01 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[7-9],其随海拔变化的吸收衰减变化关系为 $e^{-0.00721p}$ (式中 p 为大气密度单位, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$),可以得出,当在海平面水平,即 $p = 1.033 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,中子注量率为 $0.0122 \pm 0.001 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

研究也表明^[10]德国北纬 53° 的 Braunschweig 海平面附近中子注量率为 $0.0133 \pm 0.001 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。美国弗吉尼亚州北纬 45° Hampton 海平面附近中子注量率 $0.0123 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,最初的测量结果为 $0.008 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[11]。假定中子注量能量权重因子为 $200 \text{ pSv} \cdot \text{cm}^2$ (相当于 $720 \text{ nSv h}^{-1}/\text{每个中子 cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$),在注量率为 $0.013 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,其周围剂量当量率为 $9 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[8]。

一般认为,在人类可居住海拔区的中子能谱形状是不变的,因此注量剂量的转化系数也是固定的,由此可估算得在北纬 50° 左右海平面水平的中子所致人体的年有效剂量为 $80 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这一结果与 Birattari 等^[12]人的报道值 $80 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1} (\pm 5\%)$ 相吻合,实验所用测量仪器为雷姆仪。Burgkhardt^[13]等测得的海平面水平中子所致人体的有效剂量为 $60 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这个结果很可能偏低,因为实验所采样仪器对高能中子相应差。

产生中子场的宇宙射线中质子受地磁影响较大,这就导致了赤道地区的中子注量小于两极地区。研究者已经意识到了纬度效应的重要性了,但还未进行细致的实验进行验证。Florek 等^[14]采用 LAHET 软件计算得出赤道地区海平面中子注量为极地的 $1/5$,在纬

度为 50° 区域为极地的 80%。Nakamura 等^[15]研究表明,东京(北纬 24°)的海平面中子注量为极地的 $1/4$ 。这样 Birattari^[12]得到结果为北纬 50° 的辐射水平为 $9 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ (约 $80 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$)。Nakamura 等研究结果表明^[15]在纬度大概北纬 24° 时为 $4 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。如此在海平面水平来自宇宙射线辐射中子成份的周围剂量当量率为 $5.5 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。而户外直接电离和光子成分的世界平均值为 $340 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$,中子成分的平均值为 $48 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 乘以 2.5(海拔高度因子) $120 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

UNSCEAR 1988 和 UNSCEAR1993^[5-6]考虑了建筑物对中子的屏蔽作用对户内的屏蔽因子为 0.4 ~ 1.0,平均值为 0.8,而以前从未给出宇宙辐射中子成份的屏蔽因子,当考虑吸收和次级中子因素后,认为合理的吸收度为 10% ~ 20%。因此,户外直接电离和光子成分的世界平均值为 $280 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$,对应的中子平均值为 $100 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

在国内,1989 - 1992 年,国家自然科学基金资助了题为“反射宇宙中子在地学中的应用”成功地研制了 RCN - 1 型轻便宇宙中子测量仪,并进行了初步的实验^[16],研究者利用自行研制的轻便型宇宙中子测量仪^[17](3 支 BF_3 正比计数管并联构成中子探头、慢化层、屏蔽层和主机四部分组成)对成都地区的天然中子辐射进行长期监测,其结果表明地空界面上天然中子流的强弱与天气、地质环境及地表建筑物或物体的分布存在一定的关系。监测结果显示在阴天天然中子流强度平均值为 0.4 s^{-1} ,而晴天为 0.47 s^{-1} ,风云变化的天气情况下天然中子流强度较为稳定,而在雷电暴风天气情况下天然中子流强度明显增高。研究也认为地空界面上的天然中子注量率与地磁纬度有关,中子注量率在一定的纬度范围内随纬度的增高而增高,由北纬 22° 至北纬 30° 的变化过程中子注量率可增加 40% ~ 50%。

3.2 航行器内人员的暴露水平 对航行器线路上的剂量研究需要不同海拔高度、不同纬度的中子暴露信息,尤其需要知道具体飞行器的路线和高度,而且与时间有关,尤其需要考虑的因素是飞行器高度上高能中子的测量。

关于这方面的研究文献报道不多。采用热释光探测器(TLD)结合固体核径迹探测器 F. Spurny 等^[18-19]测量仪器测量宇宙辐射剂量时可以给出中子剂量。

陈英明^[20]等利用 TLD 探测器和 CR - 39 中子探测器测量机组人员个人受照剂量水平,并进行放射卫生学评价。测量并校正得到波音和萨博机组人员接受

的中子剂量分别为 $1.32 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.75 \text{ mSv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

B. Vukovic^[21]等采用 LR - 115 径迹探测器和 BN - 1 型硼箔中子剂量计测量了 2005 年南斯拉夫南部萨格勒布机场起飞的一些国际航线上的中子剂量,测量结果为“萨格勒布—巴黎—布宜诺斯艾利斯”航线往返的中子剂量率为 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ ，“萨格勒布—法兰克福—东京”航线的中子剂量率为 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

另外一些近年开发的便携式探测器,如 Neutron-RAE II 可以在 5 秒内对中子射线($< 3.0 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)做出响应,其核心装置为碘化锂闪烁晶体。

4 结论

长期以来人们主要侧重于对人工中子源(反应堆、加速器等核装置)中子辐射场的理论研究、实验测量、应用和防护等,而对地空界面上天然中子辐射场的研究国内文献报道并不多见。另一方面,从地球物理学中放射性场的研究而言,注重于对伽玛场和环境氡的监测与研究,对中子辐射场的研究,由于其探测技术上的难度,文献论述不多。

通过比较已有的数据可以看出,在海平面水平来自宇宙射线辐射中子成份的周围剂量当量率为 $5.5 \text{ nSv} \cdot \text{h}^{-1}$,户外直接电离和光子成分的世界平均值为 $280 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$,对应的中子平均值为 $100 \mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$ 。航行器上民用航空国际航线上中子剂量率约为 $2.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

参考文献

- [1] 葛良全,赖万昌,林延畅,等. 地—空界面天然中子辐射场的扰动及其环境意义[J]. 地球科学进展,2004, (S1): 9 - 14.
- [2] 葛良全. 地—空界面天然中子辐射场的研究及其意义[A]. 中国地球物理学会. 中国地球物理学会年刊 2002—中国地球物理学会第十八届年会论文集[C]. 中国地球物理学会,2002:1.
- [3] 宋仔峰. 基于 GEM 的热中子位置灵敏探测器的研究[D]. 中国科学技术大学,2010.
- [4] Бондареюко В М. Новые методы инженерной геофизики[M]. Недра,1983. 48 - 96.
- [5] UNSCEAR, 2000. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. 2000 Report to the General Assembly with Annex B: Exposures from Natural Sources of Radiation. UNSCEAR 2000 report[R]. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). New York.
- [6] UNSCEAR, 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1993 Report to the General Assembly with Annex A: Exposures from Natural Sources of Radiation[R]. UNSCEAR 1993 report, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UN-

- SCEAR). New York.
- [7] Schraube H, J Jakes, A Sannikov, et al. The cosmic ray induced neutron spectrum at the summit of the Zugspitze(2963 m)[J]. Radiation Protection Dosimetry. 1997, 70 (1): 405–408.
- [8] Roesler S, W Heinrich and H Schraube. Calculation of radiation fields in the atmosphere and comparison to experimental data[J]. Radiation Research. 1998, 149(1): 87–97.
- [9] Schraube H, G Leuthold, S Roesler, et al. Neutron spectra at flight altitudes and their radiological estimation[J]. Advances in Space Research. 1996, 21(12): 1727–1738.
- [10] Alegra A V. Neutron spectrometry with Bonner spheres: Applications in physics and dosimetry[J]. Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig, 1996.
- [11] Goldhagen P. Communication to the UNSCEAR Secretariat. 1999.
- [12] Birattari C, B Moy, T Rancati, et al. Neutron measurements at some environmental monitoring stations. Internal Report. 1996. CERN, TIS – RP/IR/96 – 13.
- [13] Burgkhardt B, E Piesch and M Urban. Measurement of the neutron dose equivalent component of the natural background using electrochemically etched polycarbonate detector and boron – 10 radiator[J]. Nucl. Tracks 12; 573–576 (1986).
- [14] Florek M, J Masarik, I Szarka, et al. Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude[J]. Radiat Prot Dosim. 1996, 67(3): 187–192.
- [15] Nakamura T, Y Uwamino and T Ohkubo. Altitude variation of cosmic – ray neutrons[J]. Health Phys. 1987, 53(5): 509–517.
- [16] 葛良全, 谢庭周, 周四春, 等. 轻便型宇宙中子测量仪的研制[J]. 核技术. 1994, 08, 481–487.
- [17] 叶森钢. 地空界面天然宇宙中子辐射场的研究[D]. 核技术及应用, 2003.
- [18] F Spurny, O Ploc, I Jadnickova, K Turek, T Dachev, M Gelev. Monitoring of onboard aircraft exposure to cosmic radiation; May – December 2005[J]. Advances in Space Research. 2007, 40(11): 1551–1557.
- [19] T Berger, M Meier, G Reitz, M Schridde. Long – term dose measurements applying a human anthropomorphic phantom onboard an aircraft[J]. Radiation Measurements. 2008, 43(2–6): 580–584.
- [20] 陈英民, 李福生, 林俊明, 等. 航空机组人员个人受照剂量水平及评价[J]. 中国辐射卫生, 1999, 8(4): 206–207.
- [21] B Vukovic, V Radolic, I Lisjak, B Vekic, M Poje, J Planinic. Some cosmic radiation dose measurements aboard flights connecting Zagreb Airport[J]. Applied Radiation and Isotopes. 2008, 66(2): 247–251.

收稿日期: 2016–11–21 修回日期: 2017–03–27

(上接第 213 页)

- [1] 中华医学会核医学分会. 2014 年全国核医学现状普查简报[J]. 中国核医学与分子影像杂志, 2014, 34(5): 389.
- [2] 张震, 张奇, 朱卫国, 等. 核医学放射防护状况调查与分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32(6): 642–644.
- [3] 喻洁, 黄鹤, 马新兴, 等. 核医学科项目放射防护评价中平面布局分析[J]. 中国辐射卫生, 2015, 24(1): 75–76.
- [4] 江丽红, 孟月杰, 刘永, 等. 核医学工作场所改建项目设计存在问题与对策[J]. 中国职业医学, 2015, 42(5): 599–600.
- [5] 贾秋玉. 现代医院核医学科建筑的规划及设计研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院. 2010.
- [6] 黄世耀. 核医学科的平面布局及选址规划探讨[J]. 海峡科学, 2015, (3): 12–16.
- [7] 张奇, 练德幸, 梁婧, 等. PET/CT 工作场所合理布局设计的探讨与分析[J]. 中国医学装备, 2014, 11(6): 46–49.
- [8] Methe BM; Shielding design for a PET imaging suite; a case study[J]. Health Phys, 2003, 84(5): 83–88.
- [9] 格日勒满达呼, 哈日巴拉, 王成国, 等. 从某医院核医学学科布局设计看职业病危害预评价的意义[J]. 职业与健康, 2012, 28(23): 2902–2904.
- [10] 耿建华, 陈英茂, 陈盛祖, 等. PET/CT 中心建设之三一场地选址与布局设计[J]. 中国医学装备, 2013, 10(6): 1–4.
- [11] 陈悦欢, 李兰权, 陈健驹, 等. PET/CT 中心建设的场地选址与布局设计分析[J]. 中国医学装备, 2015, 30(7): 137–138.
- [12] International Atomic Energy Agency, Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine[R]. Safety Reports Series No. 40, IAEA, Vienna (2005)
- [13] International Atomic Energy Agency[R]. Nuclear Medicine Resources Manual, IAEA, Vienna (2006)
- [14] AAPM, 2006. American Association of Physicists in Medicine, AAPM Task Group 108; PET and PET/CT Shielding Requirements Med[R]. Phys. 33, 1, 2006
- [15] Australian Radiation Protection and Nuclear[R]. Radiation protection in nuclear medicine. Radiation Protection Series Publication No. 14. 2, ARPNSA (2008)

收稿日期: 2016–12–03 修回日期: 2017–04–06