易水湖水下天然中子测量

吴建华,徐勇军*,陈 然,刘森林,汪传高,李传龙,王 薇

(中国原子能科学研究院 辐射安全研究所,北京 102413)

摘要:使用研制的以球形³ He 正比计数器为中子灵敏元件的水下中子测量装置对易水湖水下 1~25 m 范围内不同深度处的天然中子进行了测量,并结合相应的蒙特卡罗模拟,获得了易水湖水下不同深度处的低能天然中子产生速率和注量率随湖水深度的变化规律。结果表明:在易水湖水面下方 1~10 m 范围内,低能天然中子产生速率 $c(cm^{-3} \cdot s^{-1})$ 随深度 h(cm) 呈指数规律下降,关系式为 $c = 2.7 \times 10^{-5} e^{-0.0057h}$,10 m 以下的变化较为平缓。根据测量结果外推,在易水湖水面附近,水中低能天然中子的产生速率约为 $2.7 \times 10^{-5} cm^{-3} \cdot s^{-1}$ (或 $2.7 \times 10^{-5} g^{-1} \cdot s^{-1}$)。

关键词:水下中子测量;天然中子能谱;低能天然中子

中图分类号:X837 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2017)09-1704-06 doi:10.7538/yzk.2016.youxian.0789

Measurement of Underwater Natural Neutron in Yi Lake

WU Jian-hua, XU Yong-jun^{*}, CHEN Ran, LIU Sen-lin, WANG Chuan-gao, LI Chuan-long, WANG Wei

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-15, Beijing 102413, China)

Abstract: The underwater natural neutron with different water depths from 1 m to 25 m in Yi Lake was measured by an underwater neutron measuring device which uses a spherical ³He proportional counter as the neutron sensitive component. Combining with some Monte Carlo simulations, the low energy natural neutron generation rate and fluence rate at different depths in Yi Lake were acquired. The results indicate that the low energy natural neutron generation rate \dot{c} (cm⁻³ • s⁻¹) varies as a rule of negative exponent of $\dot{c}=2.7 \times 10^{-5} e^{-0.0057h}$, when the water depth h (cm) is from 1 m to 10 m in Yi Lake. When the water depth is more than 10 m, the generation rate and fluence rate change slowly. Extrapolating from the results, the generation rate of the low energy natural neutron in water near the water surface of Yi Lake is about $2.7 \times 10^{-5} cm^{-3} \cdot s^{-1}$ ($2.7 \times 10^{-5} g^{-1} \cdot s^{-1}$).

Key words: underwater neutron measurement; natural neutron energy spectrum; low energy natural neutron

收稿日期:2016-12-06;修回日期:2016-12-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11575294)

作者简介:吴建华(1986一),男,湖南衡东人,助理研究员,博士,辐射防护与环境保护专业

^{*}通信作者:徐勇军,E-mail: yjxu@ciae.ac.cn

天然中子是天然本底辐射的重要组成部 分,广泛存在于大自然环境中^[1]。随着人们对 天然中子的应用和剂量评价的重视^[1-2],很多国 家和地区开展了天然中子剂量和能谱测量研 究^[3-7]。根据国内外研究结果,海平面附近天然 中子注量率约 0.01 cm⁻² · s⁻¹,周围剂量当量 率约 5~10 nSv/h,天然中子注量率随海拔的 增加呈指数规律增加^[6-8];天然中子的分布还与 地磁纬度、周边介质等因素有关^[9-10]。天然中 子能量分布范围广(从热中子到几百 MeV),存 在 3 个分布的峰值,同一地磁纬度下,在地面上 方几 km 的大气范围内,空气中天然中子能谱 形状几乎不随海拔高度的变化而改变^[3,5-6]。

目前,测量天然中子能谱的仪器主要是 Bonner 多球中子谱仪。开展天然中子测量时, 由于环境中天然辐射射线成分较复杂,环境中 的其他射线粒子会不可避免地对测量结果产生 一些影响。如使用多球中子谱仪进行测量时, 对于大直径的慢化球,这些粒子在其内部产生 数量可观的原初中子[4,11-12],与来自慢化球外 的环境天然中子一起共同给出中子探测器的计 数,这部分的贡献可达总计数的50%以上。数 据分析过程中,若不扣除这部分原初中子的影 响,将会导致测量的天然中子能谱高能部分增 加,使能谱偏硬,天然中子注量率偏高,造成难 以准确评价天然中子场对人体的剂量等问题。 因此,探讨天然环境中除中子外的其他粒子与 中子探测器材料,特别是与慢化材料相互作用 过程中产生的中子引起探测器额外计数的情 况,并在环境天然中子能谱测量中科学地扣除 其影响,是天然中子能谱准确测量工作中一个 重要的环节。

本文选择湖水作为慢化材料来研究天然中 子在其内的产生和变化规律,使用自行研制的 水下中子测量装置对易水湖水下1~25 m 范 围内的天然中子进行测量,并结合相应的蒙特 卡罗模拟对易水湖水下天然中子注量率在水体 中的分布规律及宇宙射线中除中子外的粒子与 水体相互作用产生中子的速率进行分析。

1 测量仪器与方法

为开展水下天然中子测量工作,自行研制 完成一套水下中子测量装置。此水下中子测量 装置由美国 LND 公司生产的 LND-270114 球 形³He 正比计数器(直径 10 cm, 6.5 个大气 压)、不锈钢密封容器、相关的电子学组件、数据 获取系统以及测量深度控制装置等组成。在进 行实地测量前,在实验室对测量装置进行测试 和校准。

本次测量选择河北易水湖安各庄附近湖 面,湖面海拔高度 128 m。测量选取湖面中心 一点进行,其经度为 115°14′09.146″E,纬度为 39°17′07.664″N,测量区域水深 27 m,离岸距 离大于 500 m。

测量时将水下中子测量装置按设计连接、 安装好后,通过升降装置调节其深度,使³He 正 比计数器的中心到达需测量的深度,测量数据 由计算机进行数据获取与储存。开始测量后每 隔1000s自动保存1次数据。测量时间随测 量深度的增加而增加,在25m深时,测量时间 为8h,测量总计数为56。

2 测量结果与分析

2.1 测量结果

测量结束后,对³He 正比计数器的沉积能 谱中的(n,p)反应计数进行统计,结果如图 1 所示。



图 1 易水湖水下不同深度处天然中子测量计数率 Fig. 1 Measured count rates of natural neutron with different water depths in Yi Lake

从图 1 可知,测量深度小于 10 m 时,探测器的计数率随深度的增加而迅速减小,水下 2 m和 5 m 处的净计数率分别为水下 1 m 处的净计数率的 53% 和 10%,而测量深度大于 10 m后,计数率趋于稳定。因此,取水下 10 m

以下(不含 10 m)数据的平均值作为测量的本 底,其值约为 1.88×10^{-3} s⁻¹。由于天然中子 来源于宇宙射线与物质的相互作用,其在物质 中的减弱可用多个指数函数的叠加进行描述, 参考文献[7-8]中天然中子在空气中的指数变 化关系,对探测器在水下 $1 \sim 10$ m之间测量的 净计数率进行指数函数拟合,可得水下 $1 \sim$ 10 m之间该装置的(n,p)反应净计数率与深度 的关系为.

 $\dot{n} = (0.022 \pm 0.003)e^{-(0.0057\pm0.0007)h}$ (1) 其中: \dot{n} 为探测器中(n,p)反应的净计数率, s⁻¹;h 为在水体中的深度,cm。式(1)的拟合度 为 0.99。

2.2 探测器响应值的模拟

³He 正比计数器对热中子较灵敏,由其对 天然中子参考谱^[3]的(n,p)响应可知,响应主 要来自能量小于 0.1 MeV 的低能中子的贡献 (占 99.4%,图 2)。由此,根据低能中子的分布 即可精确获得³He 正比计数器的(n,p)反应计 数等参数。







基于中子输运理论对中子在水中的慢化、 传输进行分析可知,若水中产生的中子的能量 约为 0.1 MeV 以上,经与水体的充分相互作用 后,水中的低能中子能谱形状几乎与初始中子 能谱无关,而仅取决于介质的组成,对于空气、 土壤中的天然中子也是如此。使用蒙特卡罗模 拟对此进行验证,图 3 为模拟结果。由图 3可 知,水中产生的天然中子能谱无论采用²⁵² Cf 中 子谱^[13]或²⁴¹ Am-Be中子谱^[13]、Hess 等^[3]测量 的天然中子参考谱和 Kowatari 等^[7]测量的天 然中子参考谱,在水体中充分慢化后,低能中子 谱形状均基本相同,与采用的原初天然中子谱 几乎无关,具体结果列于表1(表1中的数据为 水体单位体积中产生1个中子时的数据)。同 时,根据目前的一些研究成果^[4],原初天然中子 中有很大一部分来源于蒸发中子,而这部分中 子可用裂变中子谱近似描述。因此,尽管目前 还难以获得初始天然中子的准确能谱,但选 择²⁵² Cf 裂变中子谱作为水中天然中子的初始 能谱,仍可精确获得水中天然中子低能段的能 谱形状、中子产生速率等数据。



图 3 不同中子谱在水体中充分慢化后的低能中子谱 Fig. 3 Low energy neutron spectra of different neutron spectra moderated by water

表 1 不同中子谱经水体慢化后的能谱参数 Table 1 Spectrum parameter of different neutron spectra moderated by water

中子谱	低能中子 注量/cm ⁻²	热中子 注量/cm ⁻²	热中子与低能 中子的注量比
²⁵² Cf 中子	65.4	56.1	0.86
²⁴¹ Am-Be 中子	64.4	55.2	0.86
天然中子[3]	62.8	53.9	0.86
天然中子[7]	59.6	53.3	0.89

为得到该装置对天然中子的响应值以及水体中探测器位置的中子注量与原初天然中子产生速率的关系,采用底面半径为200 cm、高为500 cm 的柱形水体进行蒙特卡罗模拟分析,模拟时²⁵² Cf 中子在水体中均匀分布。统计水体中心位置处的中子注量,归一至水体单位体积中产生1个²⁵² Cf 中子的情况,得到中子总注量

为 78.2 cm⁻²,低能中子注量为 65.4 cm⁻²,即 低能段中子注量转换系数(单位²⁵² Cf 中子的产 生速率引起的低能中子注量)为 65.4 cm。水 下中子测量装置放入该水体后,统计探测器的 (n,p)反应计数,归一至单位体积产生 1 个²⁵² Cf 中子的情况,其获得的(n,p)反应计数为 8.04× 10^2 ,由此得到该测量装置对水中均匀产生²⁵² Cf 中子的(n,p)响应为 8.04× 10^2 cm²。

2.3 水面上方空气中和湖底产生的天然中子 对水体中天然中子分布的影响

为分析水面上方空气中以及湖底产生的天 然中子对水体中天然中子分布的影响,本工作 通过蒙特卡罗模拟计算 Hess 等^[3]和 Kowatari 等^[7]测量的天然中子参考谱从水面入射水体 时,中子测量装置位于水下不同深度处的响应, 模拟结果列于表 2。由文献[7,9]可知:海平面 的中子注量率约为 0.01 cm⁻² · s^{-1[4]},且海拔 每增加 1 200 m 左右中子注量率增加 1 倍。易 水湖的水面海拔为 128 m,以此推算易水湖水 面的中子注量约为 0.011 cm⁻²,据此可估算水 面上方入射的天然中子对测量装置的计数率贡 献,表 2 亦列出了这一结果,表 2 中,*n*。为水面 上方天然中子入射引起的计数率估算值,*n*。/*n* 即为计数率贡献。

Table 2 Count rate contribution of overwater natural neutron to measuring device								
天然中子参考谱来源	h/cm	响应/cm ²	$\dot{n}_{ m c}/{ m s}^{-1}$	\dot{n}/s^{-1}	计数率贡献/%			
Hess 等 ^[3]	100	8.79 \times 10 ⁻²	9.7×10 ⁻⁴	1.5×10^{-2}	6.3			
	138	4.56×10 ⁻²	5.0×10 ⁻⁴	1.1×10^{-2}	4.8			
	150	3.19×10 ⁻²	3.5×10 ⁻⁴	9. 2×10^{-3} ⁽¹⁾	3.8			
	200	1.68×10^{-2}	1.8×10^{-4}	9.0×10 ⁻³	2.1			
	300	3.88 $\times 10^{-3}$	4.3×10 ⁻⁵	5.6×10 ⁻³	0.8			
Kowatari 等[7]	100	2.26×10 ⁻¹	2. 5×10^{-3}	1.5×10^{-2}	16			
	138	1.29×10^{-1}	1.3×10^{-3}	1.1×10^{-2}	12			
	150	8.51×10 ⁻²	1.1×10^{-3}	9. 2×10^{-3} ¹⁾	10			
	200	4.28×10^{-2}	4.7×10 ⁻⁴	9.0×10 ⁻³	5.2			
	300	9.29×10 ⁻³	1.0×10^{-4}	5.6×10 ⁻³	1.8			

表 2 水面上方天然中子对测量装置的计数率贡献

Table 2 Count rate contribution of overwater natural neutron to measuring devi	Table 2	Count rate	contribution	of	overwater	natural	neutron	to	measuring	dev	ic
--	---------	------------	--------------	----	-----------	---------	---------	----	-----------	-----	----

注:1) 根据式(1)计算得到的数据

从表 2 可知,随水深的增加,由于入射中子 与水会发生相互作用,如散射、吸收、慢化等,水 面上方天然中子在探测器中引起的计数率迅速 下降。对于 Hess 等^[3]获得的天然中子谱,引起 的1 m深度处探测器计数率约为 1×10^{-3} s⁻¹, 2 m处约为 2×10^{-4} s⁻¹; 而对于 Kowatari 等^[7] 获得的天然中子谱,1 m 深度处探测器计数率约 为 2.5×10^{-3} s⁻¹,2 m 处则约为 5×10^{-4} s⁻¹。 两种入射谱相比,在水下 $1 \sim 3$ m 范围内, Kowatari等^[7]的谱获得的计数率较高(约为 Hess 等^[3]的谱的 2 倍),其原因是前者能谱较 硬(图 1),含有较多的数百 MeV 能量的中子, 其在水中传输的距离较远,在该深度范围内中 子数量相对较多。同时,还可从表 2 中看出,深 度大于1m后,由水面上方入射的天然中子引 起的(n,p)计数在探测器总(n,p)计数中贡献 的比例不大于16%,2m以下则不大于5%。

由于本次测量的统计误差在 15% 左右,因 此,在深度大于 1 m 后,来自水面上方的天然 中子对探测器的计数率贡献不高于 16%,当水 深大于 1 m 后可忽略来自水面上方天然中子 的影响。同理,在湖底 1 m 以上的水体中也可 忽略来自湖底的天然中子的影响。即在易水湖 水下 1~10 m 范围内,探测器测量的计数主要 来自水体中产生的中子。

 水下低能天然中子注量率及其产生速率 随深度的变化

根据水下中子测量装置测量的计数率以及

其对中子的响应、水下中子注量转换系数,可计 算易水湖水下 1~10 m 天然中子的产生速率 和注量率。结合式(1),得到水体中的低能天然 中子产生速率 \dot{c} (cm⁻³ • s⁻¹或 g⁻¹ • s⁻¹)及低 能天然中子注量率 $\dot{\varphi}$ (cm⁻² • s⁻¹)随水深 h 的 变化关系分别为:

 $\dot{c} = 2.7 \times 10^{-5} e^{-0.0057h}$ (2)

$$\dot{\varphi} = 1.8 \times 10^{-3} e^{-0.005 7h}$$
 (3)

由式(2)可知,在易水湖水下 $1 \sim 10$ m 范 围,水深每增加 120 cm,水中低能天然中子产 生速率约降低 1/2。将式(2)外推至水面处,得 到在易水湖水面附近,水中天然中子的产生速 率约为 2.7×10^{-5} cm⁻³ · s⁻¹(或 2.7×10^{-5} g⁻¹ · s⁻¹)。天然中子能谱测量时,利用该值可估计 除天然中子以外的其他射线粒子在慢化体中产 生中子的速率。例如,海平面处,质量为 20 kg (直径约为 17 cm)的聚乙烯慢化体中,每秒产 生 0.54 个天然中子,从而可据此对加该慢化体 后探测器的计数率进行适当修正。

2.5 讨论

空气中天然中子的分布与海拔和地磁纬度 有关,同一地磁纬度处,其随海拔高度 h 的相对 变化可用指数函数 e^{αh} 描述(α 是一个用来描述 不同地磁纬度处天然中子随海拔变化的量,其 值与海拔无关,不同地磁纬度处α不同,如地磁 纬度为北纬18°~21°、28°、48°、49°和50°的α分别 为 0. 54 × 10^{-3 [14]}、 0. 64 × 10^{-3 [4]}、 0. 78 × 10^{-3 [1]}、 0.85×10^{-3} ^[15]和 1.04×10⁻³ m⁻¹^[16])。水中的 天然中子与空气中的相同,均主要来源于宇宙 射线,因此应满足相近的规律。为此,根据测量 结果,也可通过外推给出一个近似的空气中的 α。若假定水和空气对初级宇宙射线的阻止本 领与介质的电子密度呈正比,则可得出外推 α 近似为(0.62±0.10)×10⁻³ m⁻¹,该值与文献 [4,14]的结果一致,而其他几篇文献由于与本 工作的地磁纬度(北纬 27.6°)相差较大,其值 有明显差异。本工作给出的外推 α 与文献结果 在误差范围内一致,也从一个侧面反映了测量 结果的正确性。

另外,本工作给出的易水湖水面处水中天 然中子低能段注量率约为 1.8×10^{-3} cm⁻² • s⁻¹,约为海平面处空气中天然中子总注量率 1×10^{-2} cm⁻² • s⁻¹的 1/5。

3 结论

本工作对水下天然中子的分布进行了实验 测量、分析。通过研究,可得出以下结论。

1) 水中的天然中子能谱形状在低能段几 乎不受原初中子能谱的影响,用²⁵² Cf 中子谱作 为水中产生的原初中子能谱,可在较高精度下 研究水中低能天然中子能谱形状。

2) 易水湖水下 1~10 m 范围内,水体内的 低能天然中子分布随水深的增加呈指数下降。 水下 1~10 m 范围内,低能天然中子产生速率、 低能天然中子注量率随水深的变化关系分别为 $\dot{c}=2.7\times10^{-5}$ e^{-0.005 7h} 和 $\dot{q}=1.8\times10^{-3}$ e^{-0.005 7h}。

参考文献:

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation, report to the General Assembly with Scientific Annexes[R]. New York: UNSCEAR, 2000.
- [2] HEWITT J E, HUGHES L, MCCASLIN J B, et al. Exposure to cosmic-ray neutrons at commercial jet aircraft altitudes [R]. Washington: US Department of Energy, 1980.
- [3] HESS W N, PATTERSON H W, WALLACE
 R, et al. Cosmic-ray neutron energy spectrum
 [J]. Physical Review, 1959, 116(2): 445-457.
- [4] 技安室环境辐射组. 低空宇宙辐射剂量的测量 及其随海拔高度变化的经验规律[J]. 辐射防护, 1984,4(1):7-17.
 RP Group of High Energy Physics Institute. Cosmic ray dose measurement in the lower atmosphere and empirical formulas for the dependence of dose on altitude[J]. Radiation Protec-
- [5] JIANG S H, YEH J J, LIN R Y, et al. A study on natural background neutron dose [J]. IEEE
- Transactions on Nuclear Science, 1994, 41(4): 993-998. [6] FEDERICO C A, GONÇALEZ O L, FONSECA
- E S, et al. Neutron spectra measurements in the south Atlantic anomaly region[J]. Radiation Measurements, 2010, 45(10): 1 526-1 528.
- [7] KOWATARI M, NAGAOKA K, SATOH S J, et al. Evaluation of the altitude variation of the cosmic-ray induced environmental neutrons in the Mt. Fuji Area[J]. Journal of Nuclear Science

and Technology, 2005, 42(6): 495-502.

- [8] KOWATARI M, OHTA Y J, SATOH S J, et al. Evaluation of geomagnetic latitude dependence of the cosmic-ray induced environmental neutrons in Japan[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2007, 44(2): 114-120.
- [9] WU Jianhua, XU Yongjun, LIU Senlin, et al. Energy spectrum measurement and dose rate estimation of natural neutrons in Tibet region[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, 26(6): 25-28.
- [10] KOMURA K, AHMED N K, EL-KAMEL A H, et al. Variation of environmental neutron flux with altitude and depth of both water and soil [J]. Nuclear Science and Techniques, 2004, 15 (4): 248-256.
- [11] 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,1994,17(8):481-487.
 GE Liangquan, XIE Tingzhou, ZHOU Sichun, et al. A portable cosmic neutron measurement instrument[J]. Nuclear Techniques, 1994, 17 (8): 481-487(in Chinese).
- [12] MISHEV A, BOUKLIJSKI A, VISCA L, et al.

Recent cosmic ray studies with lead free neutron monitor at basic environmental observatory Moussala[J]. Sun and Geosphere, 2008, 3(1): 26-28.

- [13] IAEA. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes[R]. Vienna: IAEA, 2001.
- [14] 徐勇军,刘森林,吴建华,等. 西藏自治区天然中 子周围剂量当量率的测量[J]. 辐射防护,2014, 34(5):320-323.
 XU Yongjun, LIU Senlin, WU Jianhua, et al. Measurement of natural neutron ambient dose equivalent rate in Tibet Autonomous Region[J]. Radiation Protection, 2014, 34(5): 320-323(in Chinese).
- [15] FLOREK M, MASARIK J, SZARKA I, et al. Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1996, 67(3): 187-192.
- [16] OUVILLE A, LOWDER W M. Human population exposure to cosmic radiation[J]. Radiation Protection Dosimetry, 1988, 24(1): 293-299.