

文章编号: 1007-4627(2014)02-0183-06

西藏羊八井ARGO实验大厅内氡浓度的变化规律研究

祝凤荣, 周雪梅, 贾焕玉

(西南交通大学现代物理研究所, 成都 610031)

摘要: 利用 Lomb-Scargle 傅里叶变换法和统计折叠周期分析法, 对 2009 年 8 月到 2011 年 10 月期间西藏羊八井国际宇宙线站的 ARGO 实验大厅内的氡浓度监测数据进行研究。结果表明, 实验大厅内的氡浓度具有 1 日和半日周期变化规律, 其中以 1 日周期变化为主。在 1 d 中氡浓度的平均值为 (567.2 ± 1.1) Bq/m³, 变化幅度为 (79.0 ± 1.4) Bq/m³, 北京时间约 11:20 时达到最大, 北京时间约 23:20 达到最小。分析还表明, 在一年中月平均浓度的最小值出现在 6 月份, 而较大值出现在下半年的某些月份, 每月的日变化幅度和浓度最大时的时间多变。这些结果对环境氡的浓度变化规律及其相关理论模型研究具有重要的意义, 同时对西藏地区居住环境监测评价提供了重要的参考。

关键词: 氡浓度; 变化规律; 西藏羊八井 ARGO 实验大厅

中图分类号: 0571 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.02.183

1 引言

氡(²²²Rn)是由镭(²²⁶Ra)衰变产生的无色、无味、有天然放射性(半衰期为 3.82 d)的一种惰性气体,是世界卫生组织(WTO)公布的 19 种主要致癌物质之一^[1]。国内各地区对氡的来源、水平、变化、损伤、防治等的调查研究日益受到关注,而对氡浓度的变化因素及其变化规律的探讨是当前辐射环境卫生研究的热点问题之一^[2-7]。已有的研究表明,氡的浓度是诱发致癌的关键因素之一,不同环境中氡浓度有很大的差别,即使在同一地区由于气候变化、住房条件、房屋结构和工作环境的变化也导致氡浓度的变化。氡浓度的变化对氡浓度相关的理论和模型研究提供重要的参考依据,同时对有效防氡具有重要的意义。20 世纪 90 年代对西藏羊八井地热开发区内的地热田居民职工生活区、地热田行政办公楼、招待所、地热电厂一分厂、地热电厂二分厂的氡浓度进行调查,得到室内氡浓度随着地点的不同而发生变化,其范围是 $(4.0 \sim 74.9)$ Bq/m³,算术均值是 (16.4 ± 19.1) Bq/m³^[8],高于西藏全区平均水平^[9],近年来对西藏高海拔地区环境氡浓度鲜有报道,本文

首次利用 Lomb-Scargle 傅里叶分析法和统计折叠周期分析法对西藏羊八井 ARGO 实验大厅内的长时期内的环境氡浓度的时间变化规律进行研究,得到氡浓度的半日变化、1 日变化及月变化规律,以便为氡浓度的迁移规律及其相关的理论研究提供实验证据,同时为西藏高海拔地区环境氡浓度及居住环境评价提供重要的参考依据。

2 氡浓度测量

采用的氡监测装置为可更换的卢卡斯闪烁室(Lucas Scintillation Cell, LSC),将辐射转换为光脉冲输入到光电倍增管。LSC 相比其它测量方法,有更高的灵敏度,收集样品后探测器可在很短的时间内进行高精度分析,温度和湿度对其无影响。使用时利用标准源(²²⁶Ra)对该监测仪进行标定。

中意国际合作西藏羊八井 ARGO 实验大厅由聚氨酯泡沫保温板建成^[10],位于羊八井盆地中心。大厅是水泥地面,下面铺有保温材料。室内面积是 100 m×100 m,高阻性板 PRC 探测器地毯阵列分布在大厅中心 74 m×71 m 的范围内,主要用来记录广延大气簇射中的次级宇宙线粒子,从而开展在伽马射线

收稿日期: 2013-10-20; 修改日期: 2013-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助(11175147, 11205126); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682014CX093)

作者简介: 祝凤荣(1974-),女,山东菏泽人,博士,从事粒子物理与核物理研究, E-mail: zhufu@ihep.ac.cn。

天文、扩展伽马射线源、伽马射线暴、原初宇宙线能谱、太阳和日球层物理等方面的研究。大厅的北面墙上开有窗户作为通风口，始终保持开放状态。大厅的周围有散落的藏族民居。从 2009 年 8 月到 2011 年 10 月利用 LSC 对 ARGO 实验大厅中心位置的氡浓度进行连续监测。

3 实验数据和分析方法

3.1 实验数据

2009 年 8 月 10 日到 2011 年 11 月 30 日期间的氡浓度随时间的变化如图 1(a) 所示，图中点的纵坐标是半小时内采样一次的氡浓度，单位是 Bq/m^3 ，横坐标表示采样时间。实验大厅内的氡浓度在除了 2010 年 7 月份有异常之外，其余时间内主要在 $100 \sim 1400 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 范围内相对稳定变化。图 1(b) 表明，在 2010 年 7 月 7 日，监测到的氡的浓度突然增大到 $2000 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ，此后连续几天内都出现氡浓度突然增大的现象，甚至达到 $3500 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ，到 2010 年 7 月 23 日之后完全恢复正常。这个异常的现象，主要是为了验证大厅北面安放的 LSC 对氡浓度的监测而测量的大厅北面的较高的氡浓度。

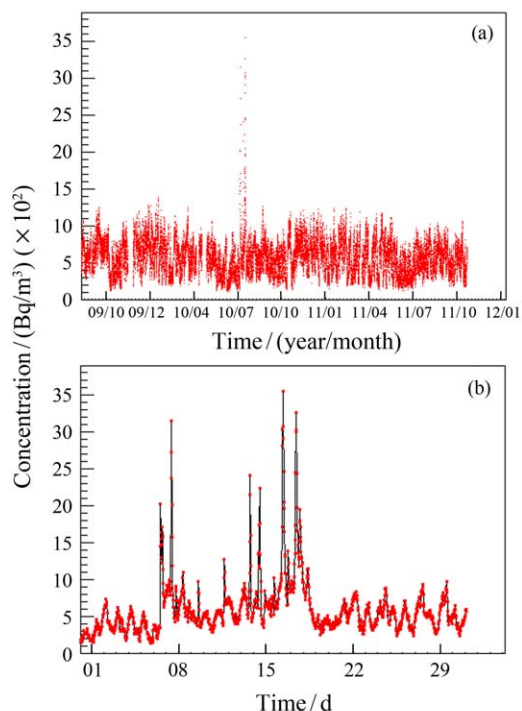


图 1 (在线彩图) ARGO 实验大厅内氡浓度随时间的变化
(a) 2009 年 8 月到 2011 年 10 月 ARGO 实验大厅内氡浓度的变化; (b) 2010 年 7 月 ARGO 实验大厅内氡浓度的变化。

除去 2010 年 7 月异常现象的实验数据，从 2009 年 8 月到 2011 年 10 月氡浓度的分布如图 2 所示，图中横坐标表示氡的浓度，纵坐标是对应的氡浓度的数量。

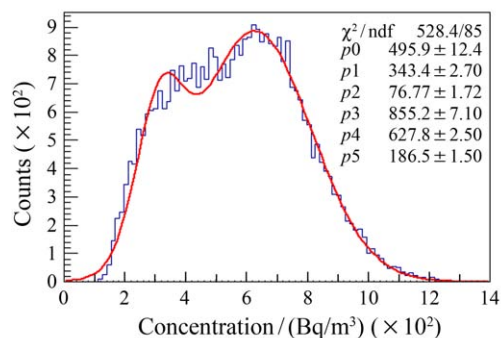


图 2 (在线彩图) 2009 年 8 月到 2011 年 10 月 ARGO 实验大厅内氡浓度的分布

图中参数 $p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$ 分别对应于拟合的 2 个高斯分布的系数。

ARGO 实验大厅中的氡浓度是两个高斯分布的叠加，两个分布极大值分别为 $\sim 313 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 和 $\sim 627 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 。2009 年 8 月 10 日到 2011 年 4 月 18 日期间的氡浓度的两个极大值分别为 $\sim 350 \text{ Bq}/\text{m}^3$ 和 $\sim 660 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ^[11]，两个不同时期的极大值在结果上是一致的。室内氡浓度随时间的变化可以由下式表示^[12]：

$$\frac{dC_{\text{Rn}}(t)}{dt} = \frac{E(t)}{V} - [\lambda - I(t)]C_{\text{Rn}}(t).$$

其中： $C_{\text{Rn}}(t)$ 是 t 时刻时室内的环境氡浓度； $E(t)$ 是体积 V 中的氡气生成率； λ 是氡的衰减常数； $I(t)$ 是室内空气交换率。根据上述公式，ARGO 实验大厅中氡浓度呈现出的两个高斯分布可以分别理解为：第一个分布是室内局域辐射和氡衰变的结果，主要来源于房屋地基土壤、含有放射性元素的建筑材料；第二个分布主要是由于室内空气交换引起的。2010 年 4 月开始测量大厅北边的氡浓度，结果显示北边的浓度大于其它地方，且具有较高的可变性。实验大厅的通风口位于大厅北边，通过通风口的空气交换，北边高浓度的氡扩散到大厅中部，使中部测量到的氡浓度变大。正是由于空气交换率的不稳定性，导致大厅内的氡浓度分布呈现出两个高斯分布的叠加。

3.2 分析方法

对于 LSC 记录到的氡浓度的观测数据 $(t_1, x_1), (t_2, x_2), \dots, (t_n, x_n), \dots$ ，这里 x_n 是

对应时刻 t_n 的氡浓度的观测值。对于该数据系列,我们采用Lomb-Scargle傅里叶变换确定氡浓度的变化周期,利用统计折叠周期分析法研究氡浓度在一个确定周期内的随相位的变化规律。

3.2.1 Lomb-Scargle傅里叶变换法

利用传统的傅里叶变换法对这些时域不均匀的实验数据进行周期分析时,可能会产生虚假信号。由Lomb发展,经过Scargle进一步完善的Lomb-Scargle傅里叶变换法可以适用于时域不均匀数据序列。如果在时域数据系列中存在某个周期信号 T ,对应于其归一化的功率谱在频率 ω 处有峰值出现,从而有效地提取出弱周期信号,也可以在一定程度上减弱时域序列的不均匀性导致的虚假信号^[13-15]。对于该方法更加详细的描述,包括功率谱的定义、频率误差的计算、信号的虚警概率等见文献^[16]。

由Lomb-Scargle傅里叶变换法得到的归一化功率谱可以确定时间序列信号中的周期信号。但对于一个频率为 ω_0 的真实周期信号,数据的有限长度、数据分布的不规则性、光谱泄露和谐波等会导致功率谱除了在频率 ω_0 处之外还在其它频率处出现峰值,这些次峰可能具有显著高度,因此不能通过虚警概率判断次峰为真实的信号。判断一个具有显著高度的次峰是否是真实周期信号的一个有效方法:先从原数据序列中过滤掉频率为 ω_0 的周期信号,再重新计算功率谱。若过滤后该次峰仍然存在,则表明该次峰不是从频率为 ω_0 的周期信号中泄漏出来,证明该次峰为真实周期信号。如果功率谱图中包含多个周期信号,此方法可重复使用。在后面的周期分析中,我们利用此方法确定数据中的真实周期信号。

3.2.2 统计折叠周期分析法

统计折叠周期分析法是一种传统的信号周期提取方法。该方法主要根据周期 T 的信号存在时的实验数据的均方偏差远大于该周期不存在时的均方偏差。对该方法的详细描述和使用步骤见文献^[16]。使用该方法不仅能够提取出数据系列中的周期信号,而且可以求出信号在一个周期内随着相位的变化规律。需要指出的是,如果在一个时变的数据序列存在多个周期信号如 T 、 $2T$ 、 $3T$ 等时,短周期 T 的信号会叠加在长周期 $2T$ 、 $3T$ 等长周期的信号上。在后面的分析中,先求出氡浓度在1日周期内随相位的变化,然后再求

出在半日周期内随相位的变化。

4 数据分析

4.1 氡浓度1日、半日变化的周期性规律

如图3(a)所示,氡浓度具有明显的短时周期变化现象。利用Lomb-Scargle傅里叶变换法对2009年8月份到2011年10月份的数据进行分析,结果如图3(b)所示,在周期 $T=0.5$ d和 $T=1$ d处,功率谱也存在极大值,且1 d处的功率远大于0.5 d处的功率,表明ARGO实验大厅内的氡浓度存在半日周期和1日周期变化规律,且以1日变化为主。

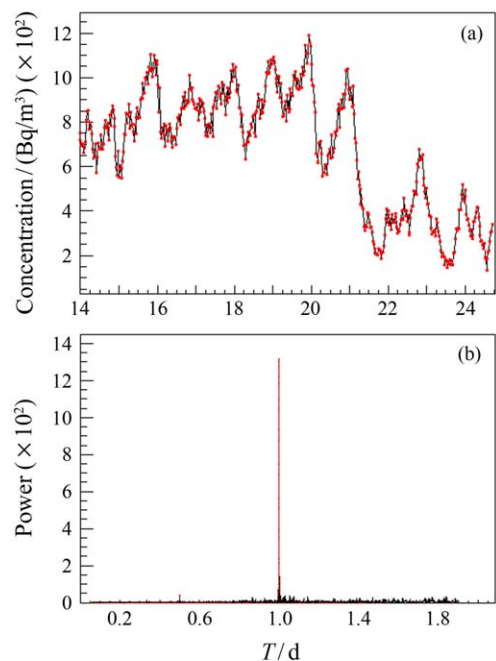


图3 (在线彩图) 实验大厅内氡浓度随时间的变化

(a) 为2010年10月14日到24日的氡浓度变化,横坐标是日期,单位:d,纵坐标是氡浓度;(b) 为氡浓度在周期范围为0.1~1.9 d的功率谱。

利用统计折叠周期分析法对氡浓度的周期信号在一个周期内的变化情况进行研究,结果如图4所示。图中横坐标为在一个周期内的时间,如0和1分别表示一天中的0:00和24:00(UT)。纵坐标为氡的浓度,其误差是1倍标准偏差。氡的浓度在一个周期内的变化用正弦曲线拟合,其中 p_0 是周期变化的幅度、 p_1 为周期变化的初相、 p_2 为氡浓度的平均值。如图中所示氡浓度的平均值为 (567.9 ± 1.1) Bq/m³,半日周期变

化幅度为 $(11.1 \pm 1.5) \text{ Bq/m}^3$ ，而 1 日周期变化幅度为 $(79.6 \pm 1.4) \text{ Bq/m}^3$ 。2009 年 8 月 10 日到 2011 年 4 月 18 日期间的氡浓度的平均值是 $(582.1 \pm 1.3) \text{ Bq/m}^3$ ，半日周期变化幅度 $(15.4 \pm 1.8) \text{ Bq/m}^3$ ，1 日周期变化幅度 $(76.6 \pm 1.7) \text{ Bq/m}^3$ ^[11]，可见增加了 2011 年 5 月至 10 月的数据后，氡浓度的平均值有所降低，半日周期变化的幅度相对降低较大，而 1 日周期变化的幅度基本没有变化，主要是由于 2011 年 5 月至 10 月期间氡的平均值和氡浓度的半日变化的幅度都降低的原因。氡浓度的日变化幅度是半日周期变化幅度的 8 倍，因此氡浓度以 1 日周期变化为主。在一天内，当世界时间 3 点 20 分，北京时间 11 点 20 分，

大厅内的氡浓度最大，在北京时间 23:20 时氡浓度最小。日变化的总体趋势与内陆其它地区基本相似，当早晨日出后，大气的逆温层被破坏，大气的对流强烈，加剧了大厅内氡的扩散，浓度减小。日落之后的一段时间内，大厅内大气的稳定度逐渐增加，氡浓度在降到最低后又逐渐增加。更详细的机制有待进一步研究。

该处的氡浓度日变化的最大和最小的时间上不同于广州和成都，广州地区氡浓度在 4:00~6:00 最大^[5]，在 18:00~21:00 最小，而成都地区在 6:00~8:00 最大，16:00~18:00 最小^[7]。这主要是由当地特定的大气环境所决定的。

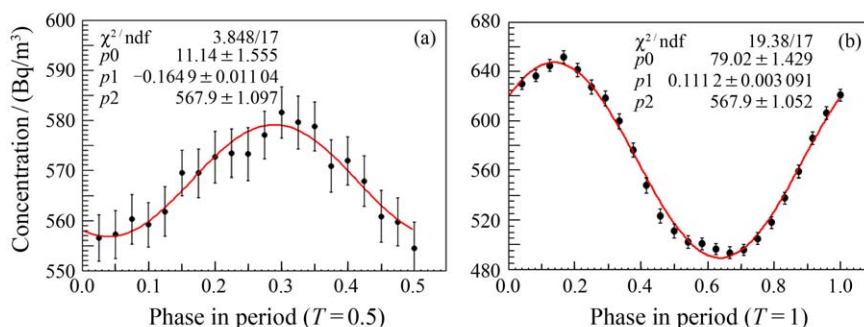


图 4 (在线彩图) 氡浓度周期内随时间的变化

(a) 为 0.5 d 的周期内的变化；(b) 氡浓度在 1 d 的周期内随时间的变化，曲线是对应谐波函数 $p_0 \sin 2\pi(x + p_1) + p_2$ 的拟合曲线。

4.2 氡浓度的月变化规律

把每个月的数据折叠到一日内得到每个月氡浓度的 1 日周期变化，如图 5(a)、(b)、(c) 所示。图中的横坐标表示时间，纵坐标依次是氡浓度的月平均值、变化幅度和初相位。如图 5(a) 所示，氡浓度的月平均值主要分布在 $450 \sim 650 \text{ Bq/m}^3$ ，较小值出现在 2010 年 6 月份和 2011 年 6 月份，而较大值出现在 2009 年 8 月份、11 月份及 12 月份、2010 年 10 月份和 11 月份，

因此氡浓度在夏季的 6 月份最小，在一年中的 8 月份、10 月份、11 月份和 12 月份都有可能出现最大。氡浓度的 1 日周期的变化幅度主要在 $66 \sim 98 \text{ Bq/m}^3$ 之间，较小值出现在 2010 年 5 月份和 6 月份，较大值出现在 2010 年 10 月份和 2011 年 5 月份，如图 5(b) 所示，因此氡浓度 1 日周期的月变化幅度比较多变。初相位是对应的氡浓度的最大值对应的时刻，每月的初相位的时间多变如图 5(c) 所示，这反映了西藏羊八井地

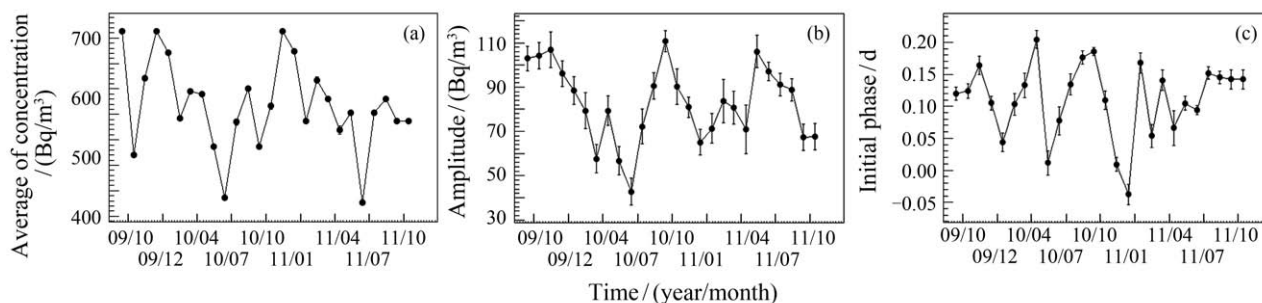


图 5 氡浓度的月平均值

(a) 变化幅度；(b) 初相位；(c) 随时间的变化。

区盆地中心复杂的大气环境, 与已经报道的中国防护研究院处测得的氡浓度的季节变化结果有差别^[17]。

5 总结和讨论

对ARGO实验大厅中部氡浓度的监测数据进行了研究, 分析了2009年8月到2011年10月西藏羊八井地区氡浓度的变化。氡浓度的变化具有半日和1日周期变化, 其中以1日周期变化为主。在1 d中氡浓度平均值为 (567.9 ± 1.1) Bq/m³, 在中午(北京时间11:20左右)时达到最大, 晚上23:20左右(北京时间)达到最小, 变化幅度为 (79.0 ± 1.4) Bq/m³。另外夏季的6月份氡浓度显著较低。

随着中国经济的快速发展, 大气污染导致的后果日益受到重视, 因此室内环境包括对氡气的监测越来越重要, 然而近年来, 西藏高海拔地区仍然只能在ARGO实验大厅内对氡浓度进行长时间监测, 没有对其它多个地区室内氡浓度的连续的长时间的监测。这些结果为西藏高海拔地区氡辐射研究和居住环境监测评价提供了重要参考。

ARGO实验大厅内的氡浓度的水平远远高于20年前报道的西藏羊八井地区的平均水平。该地距离羊八井地热开发区的地热田居民职工生活区相距500 m左右, 外部环境相似。这次较高的测量值也可能与该地点大厅内的水泥地面、房屋结构等有关。最近羊八井镇的经济逐渐发展起来, 周围建造有水泥厂等等, 也促进氡浓度的增大。西藏羊八井地区氡浓度相对过高的形成原因也有待进一步深入研究。

致谢 感谢所有参加ARGO-YBJ实验的合作组成员。

参考文献:

- [1] CLARKE H G, SOUTHWOOD T R E. *Nature*, 1989(338): 197.
- [2] LI Wanwei, TANG Yunfeng, LI Xiaohong, *et al.* *Journal of Environment and Health*, 2007, **24**(12): 1005. (in Chinese)
(李万伟, 唐云峰, 李小红, 等. *环境与健康杂志*. 2007, **24**(12): 1005.)
- [3] LI Dongming, HU Huaxi, ZHU Jun, *et al.* *Nuclear Technology*, 2006, **29**, 9: 705. (in Chinese)
(李东明, 胡华西, 诸俊, 等. *核技术*, 2006, **29**(9): 705.)
- [4] ZHANG Liang, XU Ting, GUO Qiuju. *Radiation Protection*, 2011, **31**(1): 17. (in Chinese)
(张亮, 徐婷, 郭秋菊. *辐射防护*, 2011, **31**(1): 17.)
- [5] ZHANG Lin, ZHANG Jingbo, TAN Hanyun, *et al.* *Chinese Journal of Radiological Health*, 2012, **21**(2): 203. (in Chinese)
(张林, 张静波, 谭汉云, 等. *中国辐射卫生*, 2012, **21**(2): 203.)
- [6] ZHANG Liang, HUANG Lin, GUO Qiuju. *Radiation Protection*, 2008, **5**: 286. (in Chinese)
(张亮, 黄林, 郭秋菊. *辐射防护*, 2008, **5**: 286.)
- [7] LI Lihong, GE Liangquan, CHENG Feng, *et al.* *Radiation Protection*, 2007, **27**(1): 13. (in Chinese)
(李利红, 葛良全, 程峰, 等. *辐射防护*, 2007, **27**(1): 13.)
- [8] YAO Chongde, Dayuzhen, Amiqiong, *Chinese Journal of Radiological Health*, 1993, **2**(4): 169. (in Chinese)
(姚崇德, 大玉珍, 阿米穷. *中国辐射卫生*, 1993, **2**(4): 169.)
- [9] YAO Chongde, Luosangzaba, Amiqiong, *et al.* *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 1992, **2**(1): 24. (in Chinese)
(姚崇德, 洛桑扎巴, 阿米穷, 等. *中华放射医学与防护杂志*, 1992, **2**(1): 24.)
- [10] AIELLI G, ASSIRO R, BACCI C, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2006, **562**: 92.
- [11] ZHOU Xuemei. *Observation of the Effect of the Atmospheric Electronic Field inside Thunderstorms on the EAS with the ARGO-YBJ experiment*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012: 40-44. (in Chinese)
(周雪梅. *基于ARGO-YBJ实验研究雷暴期间大气电场对EAS粒子的影响*[D]. 成都: 西南交通大学, 2012: 40-44.)
- [12] NER A V. *Lawrence Berkeley National Laboratory*[R]. 2008: 16-18.
- [13] FOSTER G. *The Astronomical Journal*, 1996, **111**(1): 541.
- [14] SCARGLE J D. *The Astrophysical Journal*, 1982, **263**: 835.
- [15] HORNE J H, BALIUNAS S L. *Astrophysical journal*, 1986, **302**: 757.
- [16] XU Bin. *Meteorological effect and temporal variation of cosmic rays with the ARGO-YBJ experiment*[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009: 72-77. (in Chinese)
(徐斌. *基于ARGO-YBJ实验的宇宙线气象效应和时间变化研究*[D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 72-77.)
- [17] HOU Haiquan, LI Suyun, ZHANG Shenghui, *et al.* *Radiation Protection Bulletin*, 1993, **5**: 20. (in Chinese)
(候海全, 李素云, 张升慧, 等. *辐射防护通讯*, 1993, **5**: 20.)

Investigation on the Variation of Radon Concentration in the ARGO-YBJ Experiment Hall

ZHU Fengrong¹⁾, ZHOU Xuemei, JIA Huanyu

(*Institute of Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract: Using the Lomb-Scargle period grams and temporal variation folded into one period for statistical analysis, the radon concentration in the ARGO-YBJ experiment hall from Aug. 2009 through Apr. 2011 was investigated. Our results show that the radon concentration has main periods of half-day and 1-day with the period of 1 day being dominant. In one day the radon concentration reaches its peak at 11:20 (Beijing Time) and reaches the minimum at 23:20(Beijing Time). In one year, the radon concentration is lower in June, the monthly variation amplitudes and initial phases folded into one day are various. These results are of importance to the study of variation of radon concentration and theoretical models, and provide a good chance to estimate the living environment in Tibet.

Key words: radon concentration; variation; ARGO-YBJ experiment hall

Received date: 20 Oct. 2013; **Revised date:** 24 Dec. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11175147,1120526); Fundamental Research Funds for Central Universities(2682014CX093)

1) E-mail: zhuf@ihep.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>