

文章编号: 1007-4627(2015)03-0286-05

利用羊八井中子监测器研究宇宙线的太阳日周期变化

全帆, 贾焕玉, 周勋秀, 祝凤荣, 杨梦琦, 郑博, 许怡昕, 刘刚

(西南交通大学现代物理研究所, 成都 610031)

摘要: 通过对宇宙线周期变化研究可以得到宇宙线产生和传播区域的重要信息, 是宇宙线长期研究的重要热点问题。利用位于西藏羊八井(地磁截止刚度: 14.1 GeV)的中子监测器 2006 至 2011 年的观测数据, 研究宇宙线的太阳日周期变化。在对中子监测器观测数据进行气压修正后, 通过 Lomb-Scargle 傅立叶变换法对修正后的数据进行周期分析, 发现宇宙线计数率存在超过地球公转运动 Compton-Getting 效应的太阳日周期变化, 该周期变化可能是地球公转效应和宇宙线传播物理过程调制效应以及剩余气象效应的叠加。计算分析了 1 日周期信号的振幅和初相位随时间的变化, 发现 1 日周期变化的初相位存在较为明显的年周期变化规律, 这可能是地球公转和自转合成运动的结果; 1 日周期变化幅度在 2010 年后出现增大趋势。这些结果对宇宙线周期变化和各向异性的研究具有重要参考意义。

关键词: 宇宙线; 中子监测器; 日周期变化

中图分类号: O572 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/ NuclPhysRev.32.03.286

1 引言

时间、空间各向同性的银河宇宙线 (Galactic cosmic rays, GCR) 进入太阳系到达地球的传播过程中, 对流、散射、扩散和绝热冷却等物理过程会产生对宇宙线的调制效应^[1]。这种调制效应有些可以表现为观测到的宇宙线强度的周期性变化, 例如宇宙线的太阳日周期变化。这里的太阳日即为太阳连续两次通过子午圈的时间。另外磁场与太阳共转, 螺旋地绕磁力线运动的宇宙线粒子也与太阳共转, 地球公转方向的地面宇宙线强度由于多普勒效应, 应该比相反方向的大。地球公转的同时又具有太阳日的自转周期, 则地球表面测量的宇宙线流强存在着太阳日变化^[2]。通过对宇宙线周期变化研究可以得到宇宙线产生和传播区域的重要信息, 是宇宙线长期研究的重要热点问题^[3-4]。20 世纪 50 年代建立起来的中子监测器 (NMs)^[5]网络在这方面的研究中取得了许多重要结果^[6]。此外很多地下 μ 子探测器也对宇宙线的调制特别是短期各向异性(日周期)的变化进行了研究, 比如, Munakata 等^[7]利用 Matsushiro 地下 μ 子探测器 1985-2008 年期间的观测数据, 分析研究了 0.6 TeV 宇宙线强度的周日各向异性; MACRO 合作组利用其 μ 子探测器数据研究了宇宙线的恒星日和太阳日调制效

应^[8]; 刘珺等^[9]利用羊八井宇宙线观测站 Tibet A S γ 阵列观测数据, 分析研究了 1 ~ 10 TeV 宇宙线流强的 0.5 和 1 d 周期变化; 贾焕玉等^[10]利用 Tibet A S γ 二期阵列实验数据, 分析研究了 10 TeV 宇宙线的半太阳日和太阳日周期变化。

但当地磁截止刚度较大 (10 ~ 20 GV) 时, 宇宙线日周期变化的银河宇宙线对流扩散模型不够精确, 能否使用还存在着争论^[11]。也就是说太阳日各向异性的确切银河宇宙线本质仍然不清楚, 需要进行仔细地研究。

位于西藏羊八井 (90.5° E, 30.1° N, 4300 m a.s.l) 宇宙线观测站的中子监测器是目前世界上海拔最高的中子监测器, 观测计数率相对地处海平面的北京中子堆高出近 100 倍, 已稳定运行多年, 并且在全球中子监测网络中羊八井中子监测器的地磁垂直截止刚度 (14.1 GV) 是相对较高的。因此羊八井中子监测器记录的数据特别适合对地磁截止刚度较大的地面宇宙线日周期变化问题进行研究。

本文利用西藏羊八井宇宙线观测站的中子监测器近年来记录的宇宙线计数率数据, 来寻找其中的太阳日周期变化, 并对这些周期变化的幅度和相位随时间的变化进行分析和讨论。

收稿日期: 2014-11-18; 修改日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11175147); 中央高校基本科研业务费专项资金(2682014CX091)

作者简介: 全帆(1989-), 女, 山东济宁人, 硕士, 从事理论物理研究; E-mail: tongfan2011@126.com

通信作者: 贾焕玉, E-mail: hyjia@swjtu.cn.

2 实验与实验数据处理

2.1 羊八井中子监测器

西藏羊八井中子监测器建于 1998 年 10 月，用于对宇宙线流强的长期观测，并希望捕捉到太阳高能粒子事件^[12]，已稳定运行多年。羊八井中子监测器地处低地磁纬度、高海拔的位置(地磁纬度 19.6° N，相应的地磁垂直截止刚度为 14.1 GV，海拔 4300 m)，由 28 支中子管组成。

羊八井中子监测器采用 NM-64 型中子管，也称超中子堆。其结构主要由中心部分的中子计数器(BF₃ 正比计数管，外壳由不锈钢构成，内充压力 20 cmHg(20 °C)的三氟化硼(BF₃)气体)、外围的核作用中子产生体铅(厚 5.1 cm)及铅与计数管之间厚 2 cm 的聚乙烯中子减速介质组成。这种利用原子量大的材料作为局部产生物质，并且用减速介质来减速局部产生的中子的方法，可使大气和周围物质中所形成和减速的中子大大减少，提高了测量的统计精确度。

当初级宇宙线进入大气层，与大气核作用产生次级粒子，其中一部分可到达地面，在中子监测器外层的聚乙烯中得到减速的中子，这些中子在铅层中与铅原子核发生核作用产生核电碎片及次级中子，中子进入正比管，产生比较大的、易于记录的脉冲^[13]。

整个中子监测器系统采用灵敏的气压和温度传感器记录羊八井的气压和室内温度，并与来自 GPS 的时间信号一起送入计算机，与计数率数据一起每 1 s 记录 1 次，计数率可达 1.07×10^7 counts/h。

2.2 气象效应修正与数据处理方法

气象效应(主要包括气压效应和温度效应)是指地球表面的宇宙线强度随地球大气状态的变化而变化的现象。

宇宙线中子主要是由宇宙线中的核成分(初级粒子和在大气中形成的次级粒子)与空气原子核相互作用所产生的，这种主要由稳定粒子的核作用所形成的中子，温度效应实际上不应该发生，中子强度只依赖于探测面以上的物质质量，所以发生的仅仅是容易计算的气压效应^[14-15]。因此我们不考虑对中子监测器温度效应的估计，只需要对观测数据进行气压修正。

地面宇宙线强度的气压效应主要是由大气对宇宙线粒子的吸收而引起的。随气压增大，穿过的大气物质增多，对宇宙线粒子的吸收作用也变大，因而导致宇宙线强度的减小；反之气压减小，宇宙线强度增大。即气压与中子监测器计数率存在反相关关系。图 1 为 2010 年 3 月的气压与中子监测器计数率的关联图。图中计算得到

的关联系数为 -0.99，这很好地反映了气压与中子监测器计数率的反相关关系。

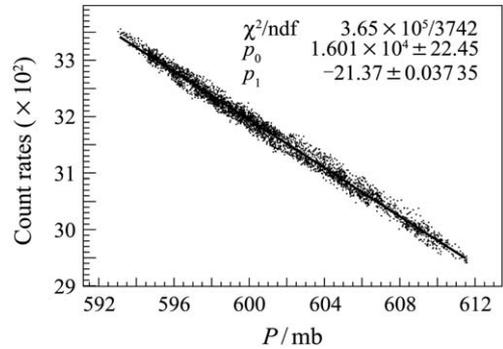


图 1 2010年3月气压与中子监测器计数率的关联
横坐标为气压，单位 mb；纵坐标为 10 min 取平均值的每秒计数率；关联系数为 -0.99，图中斜线为拟合直线。

在此基础上，通过拟合计算出气压修正系数。图 1 中 2010 年 3 月计数率修正系数为 0.68%/mb，利用该修正系数就可以对记录的计数率进行气压修正。气压效应修正前后的计数率时间变化如图 2 所示。图 3 为修正后计数率与气压的关联图，关联系数为 -0.0039，表明修正后的数据与大气压已无关联性。

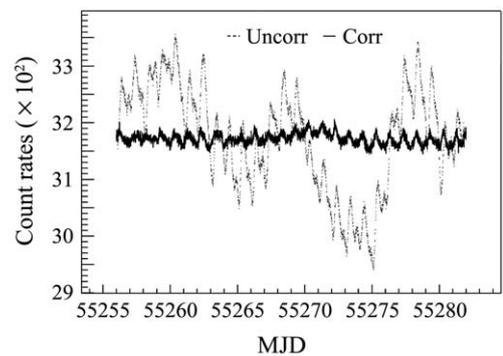


图 2 修正前后的观测数据(2010年3月)
虚线代表修正前数据，实线代表修正后数据。

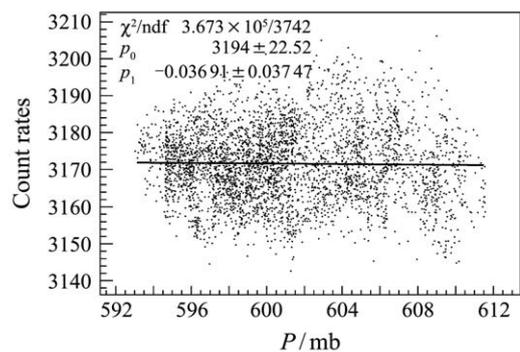


图 3 2010年3月气压与修正后计数率的关联

从图 2 中可以看出修正后计数率存在着周期变化的迹象。为了仔细研究这种周期变化，我们对修正后的数据进行频谱分析，并计算数据中周期信号的振幅和初相位。

频谱分析采用 Lomb-Scargle 傅立叶变换法^[16-20]，该方法不仅能有效地从时域序列中提取出弱周期信号，还可以在在一定程度上减弱时域序列的不均匀性导致的虚假信号。周期信号的幅度和相位的计算利用统计折叠周期分析法^[21]，这是一种传统信号周期提取法，能从信号中提取出周期的同时，还能给出相应周期信号幅度及初相位。

3 结果与讨论

我们整理了 2006 年至 2011 年共 6 年的羊八井中子监测器观测数据和对应的气压数据。在这个过程中，除了剔除粗大误差数据外，将原始的每秒记录一次的数据，进行了 10 min 平均。然后对计数率数据进行气压修正。再利用 Lomb-Scargle 傅立叶变换对修正过的数据进行周期分析，给出数据信号的周期图。

图 4 是 2010 年 3 月气压效应修正后中子监测器计数率的 Lomb-Scargle 傅立叶变换周期谱图。图中显示在周期为 0.5 和 1 d 处有极大谱峰，相应的虚警概率均小于 10^{-10} ，这表明计数率信号中存在着 0.5 和 1 d 周期信号。周期为 1 d 的谱峰高度远大于 0.5 d 的峰高，说明 1 d 周期信号为计数率数据的主要周期信号。

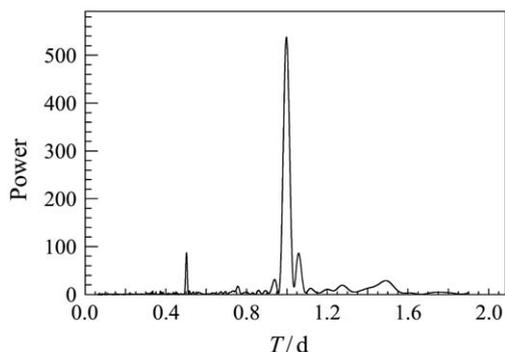


图 4 2010年3月宇宙线计数率的周期谱
横坐标为周期，单位是d；纵坐标为周期对应的功率^[16]。

太阳系在绕着银河系中心旋转的时候，宇宙线会从各个方向均匀地入射到太阳系中，由于多普勒效应的影响，在迎着太阳系运动的方向上观测到的宇宙线流强会大，而背着太阳系的方向宇宙线的流强就会降低，这种由于观测者的运动而造成的各向异性就称为 Compton-Getting 效应^[22]。同样对于地球绕太阳的公转，地球上探测器观测到宇宙线的强度会存在太阳日周期变化。气

压修正后的宇宙线计数率 1 d 周期变化可能包括这种效应。

下面我们利用统计折叠周期分析法对计数率进行周期折叠，讨论分析周期信号的振幅和初相位等。

将 2010 年 3 月的计数率按 $T = 0.5$ d 进行周期折叠，得到一个在 0.5 d 周期内计数率随时间的变化，如图 5。图 5 中用函数 $P_0 \sin(2\pi t/T + P_1) + P_2$ ($T = 0.5$ d) 进行了拟合，其中拟合参数 $P_0 = 2.8 \pm 0.61$ 为振幅、 $P_1 = -0.38 \pm 0.032$ 为初相位， $P_2 = 3171 \pm 0.4$ 是一个月内计数率的平均值。

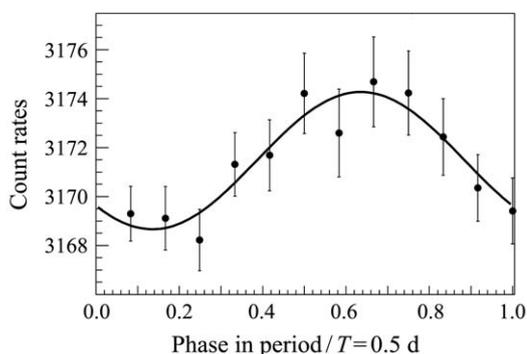


图 5 0.5 d 周期内计数率随时间的变化
横坐标为时间，其中 1 对应 0.5 d；纵坐标为计数率。

由于 0.5 日周期会对 1 d 周期折叠计算产生影响，进行 1 d 周期折叠前在计数率中减去 0.5 d 周期信号。图 6 是扣除 0.5 d 周期信号后的宇宙线计数率 Lomb-Scargle 傅立叶变换周期谱，1 d 周期信号相应的虚警概率小于 10^{-10} 。图中显示计数率中已不存在 0.5 d 周期信号了。将扣除 0.5 d 周期信号的计数率数据进行 $T=1$ d 周期折叠，得到在 1 d 周期内计数率的变化分布，如图 7 所示。从图 7 我们拟合计算得到在 1 d 周期内计数率变化的幅度和初相位分别为 $P_0 = 7.9 \pm 0.60$ 和 $P_1 = -0.12 \pm 0.011$ ， $P_2 = 3171 \pm 0.4$ 是一月内计数率的平均值。

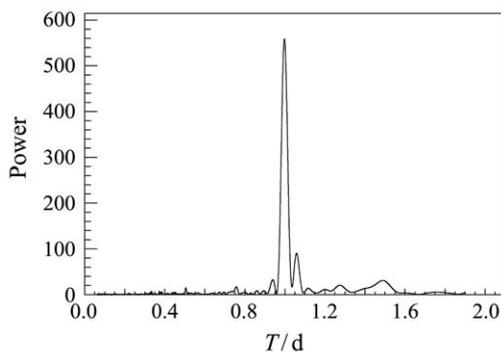


图 6 扣除 0.5 d 周期信号后计数率的周期谱

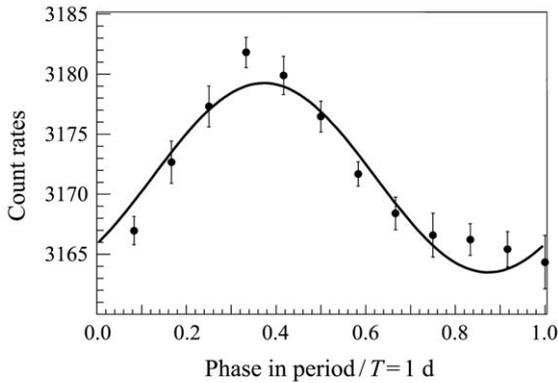


图 7 1 d 周期内计数率的变化
横坐标为时间，其中 1 对应 1 d；纵坐标为计数率。

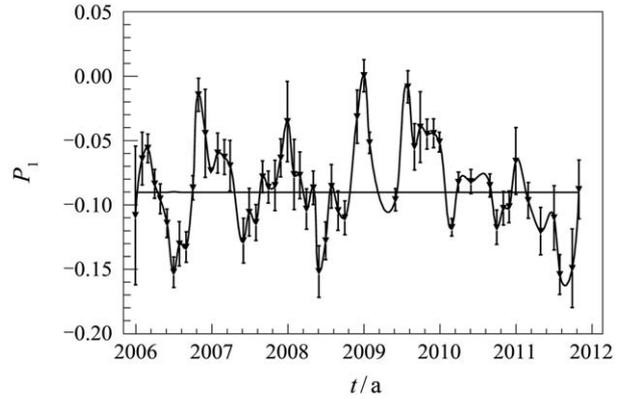


图 9 $T = 1$ d 初相位的变化
纵坐标为初相位，横坐标为时间。

我们将所有数据按月折叠、拟合求出计数率 1 d 周期变化的幅度、初相位和平均值，并检查计数率百分比(即幅度与平均值的比值)以及初相位随时间的变化。

图 8 为 $T = 1$ d 时的计数率变化百分比在 2006 年到 2011 年的变化情况，其变化百分比平均为 $(0.2 \pm 0.003)\%$ ，高于地球公转运动的 Compton-Getting 效应引起的太阳日变化幅度(约为 0.05%)。贾焕玉等^[10]分析了羊八井宇宙线观测站的另一个实验 As γ 期阵列 1994 年 11 月到 1998 年 4 月期间部分数据，发现 10 TeV 宇宙线计数率存在变化幅度为 0.075% 的太阳日周期变化，这也超出了地球公转运动的 Compton-getting 效应带来的日周期变化。本文结果与此相符。因此我们观测到的日周期变化可能是地球公转运动效应叠加了宇宙线传播物理过程的调制效应或许还有剩余气象效应的结果。

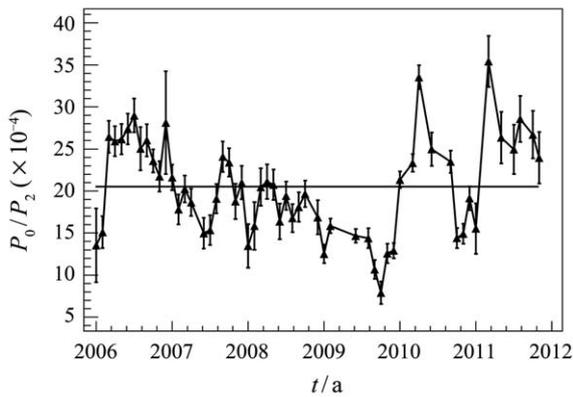


图 8 $T = 1$ d 变化百分比的变化
纵坐标为变化百分比，横坐标为时间。

另外我们发现 1 d 周期变化的幅度 2006 年至 2009 年具有下降趋势，到 2010 年开始似乎转变为上升趋势。图 9 为 2006 年至 2011 年间 $T = 1$ d 周期信号的初相位的变化，平均值为 (-0.09 ± 0.005) 。

1 d 周期变化的初相位随着时间的变化呈现年周期变化规律，也就是在 1 d 内计数率变化达到最大的时间有一个年周期变化规律，这可能是地球公转和自转合成运动的结果。

4 结论

为了研究讨论地磁截止刚度较大(10 ~ 20 GV 以上)时的宇宙线太阳日周期变化，利用羊八井宇宙线观测站的中子监测器实验，对 2006—2011 年间的实验数据进行了分析处理，发现羊八井地面宇宙线计数率存在着显著的太阳日周期变化。该周期变化可能是地球公转效应和宇宙线传播物理过程调制效应以及剩余气象效应的叠加。我们还给出了 1 d 周期变化的幅度、初相位等随时间的变化。1 d 周期变化的初相位存在较为明显的年变化规律，这可能是地球公转和自转合成运动的结果；1 d 周期变化的幅度 2006 年至 2009 年具有下降趋势，到 2010 年开始似乎转变为上升趋势。这些结果对宇宙线周期变化的研究具有重要参考价值。

致谢 感谢所有参与西藏羊八井宇宙线观测站的中外合作者所提供的帮助。

参考文献:

- [1] PARKER E N. Interplanetary Dynamical Processes (Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy)[M]. New York: Interscience Publishers, 1963.
- [2] FORMAN A, GLEESON L J. Astrophys Space Sci. 1975, **32**: 77
- [3] AMENOMORI M, BI X J, CHEN D. *et al.* Astroparticle Physics, 2012, **36**: 237.
- [4] AMENOMORI M, AYABE S, BI X J, *et al.* Anisotropy and Corotation of Galactic Cosmic Rays Science, 2006, **314**: 439.
- [5] SIMPSON J. Phys Rev, 1954, **94**: 426.

- [6] AHLUWALIA H S, FIKANI M M. Proc 25th Int Cosmic Ray Conf, 1997, **2**: 125.
- [7] MUNAKATA K, MIZOGUCHI Y, KATO C, *et al.* The Astrophysical Journal, 2010, **712**(2): 1100.
- [8] AMBROSIO M, ANTOLINI R, BALDINI A, *et al.* Astroph/0211199 2002.
- [9] LU Jun, JIA Huanyu, HUANG Qing. Nuclear Physics Review, 2004, **21** (1): 38. (in Chinese)
(刘珺, 贾焕玉, 黄庆. 原子核物理评论, 2004, **21** (1): 38.)
- [10] JIA Huanyu, WANG Sunjin. High Energy Physics And Nuclear Physics, 2001, **25**(04): 277. (in Chinese)
(贾焕玉, 王顺金. 高能物理与核物理, 2001, **25**(04): 277.)
- [11] KOTA J. Proc 25th Int Cosmic Ray Conf, 1997, **2**: 145.
- [12] ZHANG Jilong, BAO KeZhi, DING LinKai, *et al.* High Energy Physics And Nuclear Physics, 2000, **24**: 1081. (in Chinese)
(张吉龙, 鲍克智, 丁林恺, 等. 高能物理与核物理, 2000, **24**: 1081.)
- [13] TANG Yunqiu, LU Hong, LE Guiming, *et al.* Chinese Journal of Space Science 2004, **24**: 219. (in Chinese)
(唐云秋, 卢红, 乐贵明, 等. 空间科学学报, 2004, **24**: 219.)
- [14] DORMAN L I. Experimental and Theoretical Principles of Cosmic Ray Astrophysics[M]. Beijing: Science Press, 1987: 92. (in Chinese)
([苏]多尔曼著. 周志文译, 宇宙线天体物理学实验和理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 92.)
- [15] XU Bin, JIA Hyanyu, GAO Chengfang, *et al.* Nuclear Physics Review, 2008, **25**(1): 38. (in Chinese)
(徐斌, 贾焕玉, 曹成芳, 等. 原子核物理评论, 2008, **25**(1): 38.)
- [16] XU Bin. Meteorological Effect and Temporal Variation of Cosmic Rays with the ARGO-YBJ Experiment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009: 70. (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: 70.)
- [17] LOMB N R. Ap&SS, 1976, **338**: 447.
- [18] SCARGLE J D, ApJ, 1982, **263**: 835.
- [19] PRESS W H, RYBICKI G B. ApJ, 1989, **338**: 277.
- [20] ZHU Fengrong, ZHOU Xuemei, JIA Huanyu. Nuclear Physics Review, 2014, **31**(2): 183 (in Chinese)
(祝凤荣, 贾焕玉, 周雪梅. 原子核物理评论, 2014, **31**(1): 183.)
- [21] XU Bin, ZHANG Ying, JIA Huanyu, *et al.* Plateau Meteorology, 2009, **28**: 314. (in Chinese)
(徐斌, 张颖, 贾焕玉, 等. 高原气象, 2009, **28**: 314.)
- [22] COMPTON A H, GETTING I A. Phys Rev, 1935, **47**: 817.

Investigation on Solar Diurnal Variation Anisotropy of Cosmic Rays with Yangbajing Neutron Monitor

TONG Fan, JIA Huanyu, ZHOU Xunxiu, ZHU Fengrong, YANG Mengqi, ZHENG Bo, XU Yixin, LIU Gang
(*Institute of Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract: With the study of the cosmic rays' solar diurnal variation we can get the important information about Cosmic Ray's production and propagation. It's important issues of cosmic rays' studies. We analyze the temporal variation of cosmic rays rate observed with the Yangbajing neutron monitor during 2006 to 2011, and find semidiurnal and diurnal period signals included in the rates of cosmic rays with vertical rigidity equal to 14.1 GV. We have checked the time dependence of the phase and the amplitude of semidiurnal and diurnal anisotropy, and find that the phase of diurnal signal varies yearly, it could be a synthetic movement of the earth's rotation and revolution. The amplitude before 2010 is obvious smaller than that after 2010. These results are of great reference value for studying the anisotropy and time variation of cosmic rays.

Key words: cosmic ray; neutron monitor; diurnal variation

Received date: 18 Nov. 2014; **Revised date:** 19 Dec. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11175174); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682014CX091)

Corresponding author: JIA Huanyu, E-mail: hjia@swjtu.cn.

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